



UNIVATES – UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**BANCADA MÓVEL DE TESTES DE CALIBRAÇÃO PARA
MEDIDORES DE VAZÃO.**

Matheus de Carvalho Alves

Lajeado, Junho de 2020.

UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI - UNIVATES
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Matheus de Carvalho Alves

**BANCADA MÓVEL DE TESTES DE CALIBRAÇÃO PARA
MEDIDORES DE VAZÃO.**

Lajeado
2020

Matheus de Carvalho Alves

BANCADA MÓVEL DE TESTES DE CALIBRAÇÃO PARA MEDIDORES DE VAZÃO.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Instrumentação industrial.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Hennemann.

Lajeado, Junho de 2020.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, pela oportunidade de estar concluindo uma graduação, e ter me ajudado em cada momento. Aos meus pais Marciliano Oliveira Alves e Leni Teresinha de Carvalho Alves, por terem me dado todo apoio necessário nesta jornada. A amiga Isa Mara Balvedi por todo incentivo e auxílio.

Ao meu orientador Prof. Dr. Luciano Hennemann pela atenção e dedicação na orientação deste trabalho.

E um agradecimento especial a todos os meus colegas do setor de Manutenção da empresa onde desenvolvi meu projeto, da qual não mediram esforços para que este projeto se tornasse realidade.

Agradeço também a empresa Linear Automação e Elétrica Industrial, por ter me cedido o espaço e a mão de obra necessários para os testes finais do projeto.

Sem vocês nada disso seria possível!

RESUMO

Este trabalho de conclusão do curso de Engenharia Elétrica apresenta a implementação de uma bancada móvel de testes de calibração para medidores de vazão de vários tipos, com range de 0 a 10.000 L/h. Tal projeto possibilita sua mobilidade até a planta, onde esteja um dos 42 medidores da empresa, ser conectado ao mesmo e efetuar a comparação, de sua medida vazão com um instrumento de alta confiabilidade, conforme o método medidor mestre, emitindo posteriormente um certificado de aferição de calibração. Isto se dá devido a uma planta hidráulica, montada sobre um carrinho de carga industrial, que possui um sistema de bombeamento de água de um tanque, como no método medidor mestre, passa em série por um medidor do tipo Coriolis devidamente calibrado e certificado. Sendo assim, nos capítulos deste trabalho os resultados obtidos serão discutidos e comparados.

Palavras-chave: Medidor de vazão, Coriolis, testes, calibração, bancada.

ABSTRACT

This work concluding the Electrical Engineering course presents the implementation of a mobile bench of calibration tests for flow meters of various types, with a range from 0 to 10,000 L / h. Such a project allows its mobility until the plant, where one of the 42 measurer of the company, be connected to it and make the comparison, of its flow measurement with a highly reliable instrument, later issuing a calibration test certificate. This is due because hydraulic plant, mounted on an industrial cargo cart, which has a water pumping system from a tank, as in the master meter method passing in series through one calibrated and certified Coriolis type meter. Therefore, in the chapters of this work the results obtained will be discussed and compared.

Keywords: Flow meter, Coriolis, tests, calibration, bench.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. OBJETIVOS	16
1.1.1. OBJETIVO GERAL	16
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.1.3. DELIMITAÇÃO DO PROJETO.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. HISTÓRIA DA INSTRUMENTAÇÃO	17
2.2. CLASSIFICAÇÕES DA INSTRUMENTAÇÃO	18
2.3. SIMBOLOGIA	21
2.4. MEDIÇÃO DE VAZÃO	24
2.5. PROPRIEDADES DOS FLUÍDOS LÍQUIDOS	25
2.5.1. DENSIDADE, OU MASSA ESPECÍFICA	25
2.5.2. VISCOSIDADE	26
2.5.3. NÚMERO DE REYNOLDS	27
2.6. TIPOS DE MEDIDORES DE VAZÃO	28
2.6.1. MEDIDORES VORTEX	30
2.6.2. MEDIDORES TURBINA	32
2.6.3. MEDIDORES ELETROMAGNÉTICOS	34
2.6.4. MEDIDORES ULTRASSÔNICOS	35
2.6.5. MEDIDOR CORIOLIS	37
2.7. PRINCIPAIS MÉTODOS DE TESTES DE CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES DE VAZÃO	40
2.7.1. MÉTODO VOLUMÉTRICO.....	40
2.7.2. MÉTODO GRAVIMÉTRICO	42
2.7.3. MÉTODO MEDIDOR MESTRE	43
2.8. A INDÚSTRIA QUÍMICA	44
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1. CUSTOS DOS MATERIAIS.....	49
3.2. METODOS	50
3.3. MONTAGEM FÍSICA	52
4. PROCEDIMENTO DE UTILIZAÇÃO	57
4.1. UTILIZAÇÃO DO PADRÃO	57
4.2. TESTES	57
4.3. REGISTRO DAS INFORMAÇÕES	58

5. PROJETOS SEMELHANTES	59
5.1. AVALIAÇÃO METROLÓGICA DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO	59
5.2. BANCADA GRAVIMÉTRICA AUTOMÁTICA PARA CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES DE VAZÃO COM DIFERENTES FLUIDOS	60
5.3. DESENVOLVIMENTO DE UMA PLANTA PARA CALIBRAÇÃO E AJUSTES DE MEDIDORES DE VAZÃO MAGNÉTICOS.....	62
6. RESULTADOS.....	64
6.1. RESULTADOS APRESENTADOS NOS TRABALHOS SEMELHANTES	66
6.1.1. AVALIAÇÃO METROLÓGICA DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO	66
6.1.2. BANCADA GRAVIMÉTRICA AUTOMÁTICA PARA CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES DE VAZÃO COM DIFERENTES FLUIDOS	68
6.1.3. DESENVOLVIMENTO DE UMA PLANTA PARA CALIBRAÇÃO E AJUSTES DE MEDIDORES DE VAZÃO MAGNÉTICOS.....	69
7. CONCLUSÃO	70
8. REFERÊNCIAS	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de controle de malha aberta.	20
Figura 2 - Exemplo de controle de malha fechada com operador humano.	21
Figura 3 - Simbologia das válvulas.....	23
Figura 4 - Viscosidade, pela força de arraste.	26
Figura 5 - Regime turbulento e regime laminar.	28
Figura 6 – Classificação dos medidores.....	29
Figura 7 - Um objeto circular, oposto ao fluxo gerando vórtices de Von Karman.....	30
Figura 8 - Esquema de obstáculo gerando vórtices no medidor.	31
Figura 9 - Medidor de vazão vortex.	32
Figura 10 - Esquema medidor de vazão turbina.	33
Figura 11 - Exemplo de medidor de vazão turbina.	34
Figura 12 - Esquema medidor de vazão eletromagnético.	34
Figura 13 - Medidor ultrassônico.	36
Figura 14 - Ilustração do efeito Coriolis.	38
Figura 15 - Partes do medidor Coriolis.....	38
Figura 16 - Deformação dos tubos de acordo com a vazão	39
Figura 17 - Ondas senoidas detectadas.	40
Figura 18 - Esquema de calibração pelo método volumétrico.	41
Figura 19 - Esquema de calibração pelo método gravimétrico.	43
Figura 20 - Esquema de calibração pelo método medidor mestre.....	43
Figura 21 - Indústria Química de Taquari - RS.....	44
Figura 22 - Medidor Coriolis utilizado no projeto.	46
Figura 23 - Transmissor utilizado no projeto.	46
Figura 24 - Motor utilizado no projeto.....	47
Figura 25 – Dados da bomba utilizada no projeto.	47
Figura 26 - Base para motor e bomba utilizada no projeto, antes da reforma.	48
Figura 27 - Carrinho utilizado no projeto, antes da reforma.	48
Figura 28 - Tanque de 350 L utilizado no projeto.	49
Figura 29 – Malha de instrumentos do projeto.	50
Figura 30 - Visão lateral do carrinho.	51
Figura 31 - Vista superior do projeto.	51
Figura 32 - Esquema elétrico.....	52
Figura 33 - Motor e bomba montados.....	53
Figura 34 - Reforma do carrinho iniciada.....	53
Figura 35 – Gráfico de resultados presente no certificado de aferição de calibração.	54
Figura 36 – Projeto previamente montado.....	55
Figura 37 - Painel elétrico.....	55
Figura 38 - Teste do projeto.....	56
Figura 39 - Projeto semelhante.....	59
Figura 40 - Bancada montada no laboratório.	60
Figura 41 - Esquema da bancada gravimétrica.	61
Figura 42- Bancada fixa	62
Figura 43 - Esquema planta de testes de calibração de Faria.	62
Figura 44 - Bancada física do projeto de Faria.....	63
Figura 45 - Certificado de Aferição de Calibração.....	65
Figura 46 - Gráfico Padrão x Em teste.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de letras de identificação.....	22
Tabela 2 - Simbologia das malhas.	23
Tabela 3 - Classificação dos medidores de vazão.....	28
Tabela 4 - Orçamento do projeto.....	49
Tabela 5 - Tabela de leituras do certificado de calibração.....	54
Tabela 6 - Calibração teste	64
Tabela 7 - Pontos de vazão e incertezas do medidor eletromagnético 8742	67
Tabela 8 - Pontos de vazão e incertezas do medidor de área variável AP-7000	67
Tabela 9 - Resultados dos ensaios.....	68
Tabela 10 - Custos antes e pós projeto.....	69

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ISO	Organização Internacional para Padronização
PSI	Libra-força por polegada quadrada
VDC	Tensão em corrente alternada
°C	Grau Celsius
ISA	<i>Instrument Society of America</i>
kg	Quilograma
m ³	Metro cúbico
USD	<i>United States Dollar</i>
RPM	Rotação por minuto
CV	Cavalo vapor
Min	Minutos
H	Horas

1. INTRODUÇÃO

Existe uma grande variedade de processos industriais, que requerem uma alta precisão no controle de seus produtos. Da qual se faz imprescindível manter as variáveis de processo sob controle, que englobam por exemplo, vazão, pressão, nível, temperatura, PH, tensão, corrente, velocidade, posição, entre outras.

De uma forma simples, o sistema de controle é o responsável por manter a variável controlada dentro do valor determinado, por meio de uma comparação com a variável aferida, mantendo este valor dentro do seu ajuste de *set point* (BEGA *et.al.* 2011).

Deste modo, há uma necessidade histórica de se obter o controle preciso de sistemas e processos, da qual os primórdios dos instrumentos de medição e controle eram feitos de maneira manual, e que ainda perdura em muitas indústrias. Tal método requer um operador com aptidões e conhecimento a respeito das variáveis do sistema da qual irá controlar, o que expõe o sistema a uma porcentagem grande de falhas e/ou indisponibilidades (DUNN *et.al.* 2013).

Através dos instrumentos de medição é possível conservar e obter domínio sob tais variáveis de processo, tornando-as mais exatas e confiáveis do que se operadas de maneira manual por um humano.

O controle de processos nas indústrias depende totalmente da instrumentação, que vai desde processos simples até os mais sofisticados e de difícil controle como por exemplo a indústria química, que depende do domínio de muitas variáveis dependentes entre si, simultaneamente.

As tecnologias voltadas a instrumentos de medição avançam em um ritmo muito alto, de maneira que os instrumentos em uso atualmente logo se tornarão obsoletos e serão

substituídos por equipamentos mais precisos e dinâmicos. Tais mudanças se dão devido a necessidade de obter mais domínio das variáveis, qualidade de produção, eficiência e melhor desempenho. Deste modo, as técnicas existentes hoje eram impraticáveis a pouco tempo atrás. Nos tempos atuais um controlador não precisa ser dedicado a apenas um parâmetro do processo, podendo aferir e controlar diversas variáveis simultaneamente. (DUNN *et.al.* 2013).

Dentre todas as variáveis mais importantes nas linhas de produção a vazão se destaca por necessitar de múltiplos recursos tecnológicos em medidores e transmissores. Isto se dá devido a importância do transporte de fluidos tanto nos serviços públicos como abastecimento doméstico e saneamento, no nosso dia a dia, por exemplo nas bombas de combustível, medidores de gás, bem como possui uma grande responsabilidade e fatia do controle de processos nas indústrias. (BEGA *et.al.* 2011).

Aferir a vazão de um fluido através de um canal não é algo estudado apenas recentemente, grandes nomes que dispensam apresentações já se interessavam pela hidrodinâmica a séculos atrás. Como por exemplo Leonardo da Vinci, que em 1502 escreveu a lei da continuidade, intrigado com a quantidade de água por unidade de tempo que escoava em um rio. O que possibilitou na era industrial a criação de dispositivos práticos desenvolvidos por pesquisadores como Bernoulli e Venturi que futuramente nortearam o estudo da medição de vazão. (GASPARINI *et.al.* 2007).

O engenheiro da Smar Automação Industrial afirma que:

A vazão é a terceira grandeza mais medida nos processos industriais. As aplicações são muitas, indo desde aplicações simples como a medição de vazão de água em estações de tratamento e residências, até medição de gases industriais e combustíveis, passando por medições mais complexas. Vazão pode ser definida como sendo a quantidade volumétrica ou mássica de um fluido que escoa através de uma seção de uma tubulação ou canal por unidade de tempo. (CASSIOLATO *et.al.* 2008).

As aplicações são muitas, indo desde aplicações simples como a medição de vazão de água em estações de tratamento e residências, até medição de gases industriais e combustíveis, passando por medições mais complexas.

Para isto, são utilizados os medidores de vazão, que podem ser definidos como equipamentos capazes de indicar o volume ou massa de um determinado fluido que passa por uma seção tubular por unidade de tempo. (TRIELLI 2012).

O mercado apresenta uma grande variedade de tipos de instrumentos de medição e transmissão de vazão, da qual a escolha irá depender do fluido, de seu estado físico (líquido ou gás), e das características de precisão e confiabilidade. (CASSIOLATO et.al. 2008).

A maioria dos medidores aproveita o efeito de uma interação entre o fluido e o medidor. Sendo assim geralmente cada instrumento de medição de vazão é dedicado para aferir fluidos homogêneos e de uma única fase, existindo alguns raros modelos capazes de medir vazão de fluídos em variadas fases.

Dentre os mais variados tipos de instrumentos de vazão, podemos citar como um dos mais precisos e confiáveis os Medidores de Efeito Coriolis, desenvolvido por Gaspard Coriolis, engenheiro e matemático francês que no início do século XIX. Da qual o método de medição se baseia na amplitude do movimento de tubos por onde ocorre a vazão.

É de suma importância que tais instrumentos estejam bem calibrados, para manter assim a sua precisão e funcionalidade. Sendo necessário efetuar testes de, avaliando seu percentual de erro, para que este erro possa ser corrigido. Levando em consideração os medidores de vazão, sabe-se que o natural é que percam sua precisão ao longo do tempo, sendo necessário assim que sejam testados e calibrados periodicamente. Estas calibrações podem ser feitas por comparações mássicas ou volumétricas, sendo que as calibrações mássicas possuem uma precisão bem maior (GIMENES, 2005).

Como exemplo, as indústrias químicas necessitam de um alto controle de suas variáveis de processos, sendo a vazão uma das mais importantes devido a transposição de líquidos entre pontos das plantas, e também pela necessidade de um ajuste fino no controle das dosagens e envases de matéria prima (BEGA *et.al.* 2011).

Temos como exemplo de indústria química a empresa onde desenvolvi o projeto, que é uma indústria manufatureira e distribuidora multinacional fundada em Israel, presente em mais de 120 países. Fundada através da junção, em 1997, das companhias Makhteshim e Agan.

Sua jornada no Brasil se iniciou em 1970 em Londrina, Paraná com a Herbitécnica. No ano de 1978, foi fundada a Defesa em Taquari Rio Grande do Sul, da qual em 1998 a Herbitécnica e Defesa se uniram por intermédio da Makhteshim Agan formando a Milenia Agrociências. Mais tarde, em 2011 a companhia foi adquirida pela estatal chinesa ChemChina. Em 2014, a companhia foi renomeada e se encontra presente atualmente no Brasil em Londrina

– PR, e Taquari – RS. Atua na produção de produtos como herbicidas, inseticidas e fungicidas. (EMPRESA 2017).

No total, a empresa Taquariense possui cerca de 42 medidores de vazão em uso diário em sua produção. A empresa possui certificado ISO 9000, de gestão de qualidade, ISO 14000 de gestão ambiental, ISO 18000 de Gestão e certificação da segurança e saúde ocupacionais, e ISO 17025 de laboratórios de ensaio e calibração. E para manter a exatidão e consequente qualidade nos seus produtos, seus medidores e transmissores possuem um plano de calibração anual, da qual todos medidores devem ser testados e calibrados.

Uma empresa tão conceituada no mercado mundial apresenta dificuldades em sua filial de Taquari quando o assunto é calibração de medidores de vazão, pois não possui um local apropriado para efetuar seus testes. Deste modo acaba por depender que empresas terceirizadas busquem os equipamentos e levem para suas sedes para assim poderem efetuar os devidos testes e calibrações. Isso acarreta custos, e tempos de parada em suas linhas de produção. (EMPRESA 2019).

1.1.OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo desenvolver o projeto de uma bancada de testes para medidores de vazão, na finalidade de ser utilizado pela empresa de Taquari.

Este projeto não tem como objetivo promover um ambiente para calibração de medidores, o que deve ser feito em laboratórios e ambientes controlados, e sim uma bancada para aferir a calibração dos medidores de vazão, comparando-os com o medidor padrão.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Pesquisar a bibliografia do assunto, desde instrumentação básica, tipos de instrumentos, métodos e conceitos, propriedades dos fluídos, trabalhos semelhantes.

Desenvolver o projeto com base nos conhecimentos adquiridos na revisão bibliográfica para ser posto em prática.

Aquisição de materiais, com ênfase no baixo custo e reaproveitamento. Porém como total foco na qualidade e precisão deles.

Implementação prática do projeto, tendo posse do desenho de projeto, e dos materiais necessários, se faz possível efetuar a montagem do mesmo na prática.

Efetuar testes, colocando em prática a bancada construída para testar a calibração de um medidor de vazão comparando-o com o medidor padrão.

E por fim avaliar os resultados obtidos nos testes para efetuar melhorias, se necessárias.

1.1.3. DELIMITAÇÃO DO PROJETO

O projeto poderá trabalhar com um range de vazão de 0 a 10.000 kg/h.

Fluído em temperatura ambiente.

A estrutura do carrinho possui capacidade máxima de 600 kg.

A bancada se limita ao uso de água em seus testes, devido a normas da empresa, compatibilidade dos componentes e vedações, preocupações ambientais, baixo custo e facilidade de acesso ao fluído.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. HISTÓRIA DA INSTRUMENTAÇÃO

No início da era industrial, o controle das variáveis de processo era feito de maneira manual, por parte de um operador com aptidões e conhecimento a respeito das variáveis do sistema. Contavam apenas com instrumentos mecânicos e analógicos, como termômetros, manômetros e válvulas manuais. Ao longo dos anos, com o avanço dos processos e com a necessidade de ganho de tempo, e maior controle de qualidade dos produtos, se fez necessário um aumento da automação nos processos industriais que se deu por meio de instrumentos de medição e controle.

Com o avanço na instrumentação industrial, o controle das variáveis passou a ser centralizado a uma única sala por exemplo, o que proporcionou uma maior agilidade e qualidade de produção. Sendo assim, se fez possível fabricar produtos que antes eram impossíveis sob o comando manual. (AQUINO, *et.al.* 2003). Explicando melhor, segundo a empresa Homis do Brasil, os primeiros instrumentos eram de ação pneumática, o que possibilitou a automação do monitoramento e controle. O operador já não precisava mais abrir ou fechar todas as válvulas manualmente, o que reduziu o tempo necessário para monitorar o processo.

Alguns anos depois, tais controladores colocados em campo, passaram a ser instalados em uma única sala, chamada sala de controle, tornando assim centralizada parte dos elementos de controle, para facilitar o acesso à leitura e controle por parte dos operadores. Da qual, os sinais eram aferidos por elementos de medição instalados no processo, e enviados para a sala de controle por parte de um transmissor. Na sala, o responsável por processar e “traduzir” este sinal era o controlador, que feito isso, enviava um sinal para um posicionador instalado em campo que movimentava a válvula de controle para o estado desejado. Sendo que todos estes instrumentos citados eram pneumáticos, utilizando sinal 3-15 PSI, com alimentação de ar de 20 PSI. O lado negativo desta malha de controle são os vazamentos, que se dão devido a rachaduras e corrosões nas tubulações, podendo assim acarretar falhas na malha e consequentemente perdas e paradas no processo.

Nas décadas de 1950 e 1960 houve um avanço na área da eletrônica, que possibilitou na década de 1970 a construção de instrumentos de controle eletrônicos, que substituiriam em boa parte os pneumáticos. Mais tarde o sinal destes transmissores e posicionadores foi

padronizado em um sinal de corrente de 4 a 20 mA, e alimentação elétrica de 24 Vdc. Logo tais equipamentos tomaram um grande espaço nas linhas de produção, pois reduziam significativamente os custos de manutenção, devido ao tamanho reduzido e por não contarem com partes mecânicas, como os de ação pneumática. Melhorando também a precisão de medições e controle.

Mais tarde houve outra evolução, juntamente com o surgimento da computação. Devido o aumento da complexidade na produção industrial, veio junto a necessidade de se obter um maior processamento e mais malhas de controles atuando juntas, o que tornava irrealizável controlar várias malhas ao mesmo tempo, e gerir sua manutenção.

Sendo assim os sistemas de controle distribuído (DCS), tornou possível agrupar várias malhas, uma vez que possibilita controlar várias salas de controle através de uma única estação, podendo estar a quilômetros do chão de fábrica. Através do avanço na computação, o operador pode gerenciar várias malhas de controle dentro de uma tela de microcomputador, fazendo uso de redes e protocolos industriais. Podemos citar como exemplo de protocolos: *AS-Interface*, *Profibus*, *Fieldbus Foundation*, *Modbus*, entre outros (Homis do Brasil).

2.2. CLASSIFICAÇÕES DA INSTRUMENTAÇÃO

Nas indústrias os instrumentos operam em conjunto na realização de tarefas de controle ou de monitoramento. Tal conjunto de instrumentos é denominado malha, e os instrumentos que a compõe podem ser classificados como:

- Instrumentos cegos: Instrumentos que não possuem indicação visível do valor de variável aferida. Citando como exemplo temos os instrumentos de alarme, como pressostatos e termostatos, da qual só apresentam uma escala exterior que serve apenas para ajustar o ponto de atuação.
- Instrumentos indicadores: Apresentam indicação e escala graduada, sendo possível ler o valor da variável aferida e que se deseja controlar.
- Instrumentos registradores: Possuem a função de registrar a variável aferida, podendo ser de maneira contínua ou por pontos.
- Elementos primários: São os chamados sensores, e responsáveis por aferir e detectar alterações nas variáveis do processo, gerando um sinal de saída.

Chamados também de elementos primários, pois são eles que entram em contato direto com a variável a ser mensurada.

- Transdutores: É um dispositivo cuja função é converter uma informação de algum fenômeno físico aferida por um sensor em um sinal detectável, que podendo ser elétrico, mecânico, ótico etc. Isto é, o transdutor transforma um tipo de energia em outro.
- Transmissores: São instrumentos que possuem a função de receber a saída do sensor, e transmitir este sinal a distância. O elemento transdutor pode ou não ser integrado a transmissor.
- Conversores: Possui a função de receber o sinal de entrada padrão, pneumático ou eletrônico, oriundo de um outro instrumento, e convertê-lo em um sinal de saída também padrão, porém de outra grandeza.
- Controladores: Instrumentos capazes de comparar o valor da variável aferida/controlada com o valor de *set point* desejado, e feito isso efetuam a correção na variável. Faz isso eliminando ao máximo possível o valor de erro, ou *offset*. (Brandão).
- Elementos finais de controle: São responsáveis por receber o sinal de correção oriundo do controlador e com base nisto fazer alterações na variável manipulada.

A instrumentação utiliza termos próprios, padronizada com a finalidade de facilitar a comunicação entre diversas marcas e profissionais. Como podemos ver a seguir.

- Faixa de Medida (*Range*): Trata-se basicamente do grupo de valores que definem os limites superior e inferior da competência de medição dos parâmetros de transmissão ou entrada de um instrumento. Por exemplo, se um sensor de temperatura atua na faixa de 0 a 900 °C, seu range é de 0 a 900 °C.
- Ponto de Ajuste (*Set Point*): É o ponto em que se ajusta o controlador para controlar o processo.
- Alcance (*Span*): Trata-se do valor numérico que reproduz a diferença matemática entre os valores superior e inferior da faixa de aferição do instrumento. Como no exemplo anterior citado acima, seu alcance (*span*) é de 900 °C.

- **Precisão (*Accuracy*):** É a tolerância de aferição ou de transmissão do equipamento. Retrata os limites dos erros gerados com o instrumento em operação normal. (Bottega)
- **Exatidão:** Podemos definir como sendo capacidade de um instrumento de medição para gerar dar respostas próximas a um valor verdadeiro. A exatidão é indica em termos da "inexatidão", por exemplo: $\pm 2\%$ ou $+1\%$ ou -3% .
- **Erro (*Offset*):** Valor numérico que expressa da diferença entre o valor medido pelo instrumento e ao valor medido real da variável. Se o processo está em regime permanente o erro é estacionário. Por outro lado, se a variável muda com o passar do tempo, é comum que o valor mostrado no medidor seja dado em atraso. Sendo classificado então como erro dinâmico.
- **Repetibilidade:** Trata-se da propriedade de apresentar o mesmo valor de medida em operação nas mesmas condições. De maneira técnica é chamada repetibilidade a aptidão de um instrumento em produzir o mesmo sinal de saída para um mesmo sinal de entrada, e no mesmo sentido de variação.

As malhas podem ser classificadas como:

- **Malha aberta:** O sistema de malha aberta é aquele cuja informação colhida a respeito não é utilizada para ajustar quaisquer das variáveis de entrada, na intenção de compensar variações ocorridas na variável controlada.

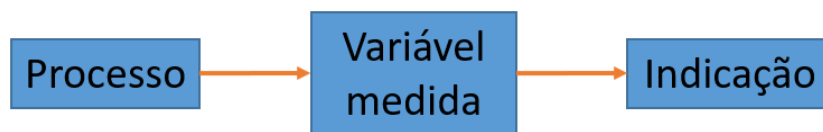


Figura 1 - Esquema de controle de malha aberta.

Fonte: Do autor

- **Malha fechada:** A malha fechada atua com um sistema de realimentação, da qual manipula a relação entrada/saída, para manter a variável em questão dentro dos limites estipulados. Ou seja, este sistema de malha funciona regulando a variável controlada, de acordo com o valor de saída medido. E isso é possível através de correções em outra variável do processo (variável

manipulada). Como exemplo da imagem 1, o operador é responsável por medir a temperatura do fluido aquecido (variável controlada) e corrigir a vazão do vapor adicionado ao trocador de calor (variável manipulada). (BEGA *et.al.* 2011).

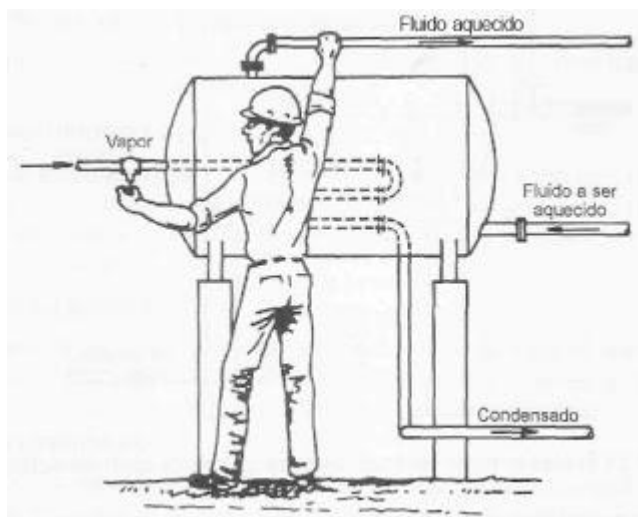


Figura 2 - Exemplo de controle de malha fechada com operador humano.

Fonte: Livro Instrumentação Industrial (BEGA *et.al.* 2011).

2.3.SIMBOLOGIA

A norma ANSI/ISA-S5.1-1984 (R1992) *Instrumentation Symbols and Identification* foi criada para padronizar a simbologia e identificar instrumentos e equipamentos de processo, sendo utilizada mundialmente.

Como por exemplo, foram definidas siglas que abreviam a nomenclatura dos instrumentos, conforme a tabela a seguir.

Tabela 1 - Tabela de letras de identificação.

















	Primeira Letra		Letras subsequentes		
	Variável medida ou inicial	Modificadora	Função de informação ou Passiva	Função Final	Modificadora
A	Analizador	-	Alarme	-	-
B	Chama de queimador	-	Indefinida	Indefinida	Indefinida
C	Condutividade elétrica	-	-	Controlador (12)	-
D	Densidade ou massa específica (<i>Density</i>)	Diferencial	-	-	-
E	Tensão elétrica	-	Elemento primário	-	-
F	Vazão (<i>Flow</i>)	Razão (fração)	-	-	-
G	Medida dimensional	-	Visor	-	-
H	Comando Manual (<i>Hand</i>)	-		-	-
I	Corrente Elétrica	-	Indicador	-	-
J	Potência	Varredura ou seletor	-	-	-
L	Nível (<i>Level</i>)	-	Lâmpada piloto	-	-
M	Umidade (<i>Moisture</i>)	-	-	-	-
N	Indefinida	-	Indefinida	Indefinida	Indefinida
O	Indefinida	-	Orifício de restrição	-	-
P	Pressão ou Vácuo		Ponto de teste	-	-
Q	Quantidade ou Evento	Integrador ou totalizador	-	-	-
R	Radioatividade	-	Registrador ou Impressor	-	-
S	Velocidade ou frequência (<i>Speed</i>)	Segurança	-	Chave	-
T	Temperatura	-		Transmissor	
U	Multivariável	-	Multi função	Multi função	Multi função
V	Viscosidade	-	-	Válvula	-
W	Peso ou Força (<i>weigh</i>)	-	Poço	-	-
X	Não classificada	-	Não classificada	Não classificada	Não classificada
Y	Indefinida	-	-	Relé ou computação	-
Z	Posição	-	-	Elemento final de controle não classificado	-

Fonte: norma ANSI/ISA-S5.1-1984

Sendo que a primeira letra identifica a variável medida pelo instrumento, ou a variável a ser controlada. E as letras subsequentes indicam as funções do instrumento. Como por exemplo a sigla TIC, significa indicador e controlador de temperatura, da qual:

- T = Temperatura;
- I = Indicador;
- C = Controlador.

Tabela 2 - Simbologia das malhas.

	Painel Principal acessível ao operador	Montado no Campo	Painel Auxiliar acessível ao operador	Painel Auxiliar não acessível ao operador
Instrumentos Discretos				
Instrumentos Compartilhados				
Computador de Processo				
Controlador Lógico Programável				

Fonte: norma ANSI/ISA-S5.1-1984

E também a simbologia das válvulas.

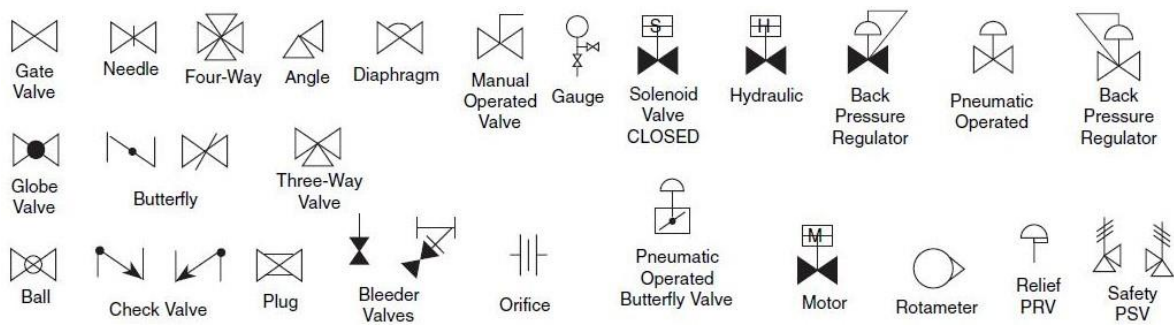


Figura 3 - Simbologia das válvulas.

Fonte: PROCESS SYSTEMS

2.4. MEDIÇÃO DE VAZÃO

Dentre todas as variáveis mais importantes nas linhas de produção a vazão se destaca por necessitar de múltiplos recursos tecnológicos em medidores e transmissores. Isto se dá devido a importância do transporte de fluidos tanto nos serviços públicos como abastecimento doméstico e saneamento, no nosso dia a dia por exemplo nas bombas de combustível, medidores de gás, bem como possui uma grande responsabilidade e fatia do controle de processos nas indústrias. (BEGA *et.al.* 2011).

O termo vazão pode ser definido como a quantidade em volume ou em massa de um fluido que escoa por unidade de tempo. Levando em consideração que a vazão pode ser classificada como:

- Vazão volumétrica: Quantidade em volume de um fluido que escoa por uma seção em determinado intervalo de tempo.

$$Q_v = \frac{dV}{dt}$$

Sendo:

dV = Variação do volume

dt = Variação do tempo

- Vazão mássica: Trata-se da quantidade em termos de massa de um fluido que escoa por uma seção em determinado intervalo de tempo (CASSIOLATO *et.al.* 2008).

$$Q_m = \frac{dm}{dt}$$

Sendo:

dm = Variação da massa

dt = Variação do tempo

Sendo a relação entre elas:

$$Q_m = Q_v \cdot \rho$$

2.5. PROPRIEDADES DOS FLUÍDOS LÍQUIDOS

Para melhor compreender o funcionamento dos medidores de vazão, se faz necessário conhecer um pouco sobre as características básicas dos fluídos. Dentro do campo de medição de vazão, temos as variáveis de influência, que causam desvios na leitura de boa parte dos modelos de medidores de vazão. Podemos citar como principais variáveis que influenciam nas características dos fluídos a pressão e a temperatura. E as principais características dos fluídos que influenciam na medição de vazão são a massa específica (ou densidade) e viscosidade.

Sendo assim, para podermos corrigir e eliminar os erros causados por estas influências, se faz necessário conhecer e quantificá-las. Para isso, grande parte dos medidores de vazão que possuem microprocessadores, possuem também um computador capaz de corrigir os efeitos causados pela pressão e temperatura.

O fluido a ser medido pode estar em três estados, sendo eles o estado líquido, o estado vapor e o estado gasoso, sendo importante para a execução deste trabalho apenas a compreensão dos fluídos em estado líquido. Vale ressaltar que no estado líquido o fluído é pouco compressível.

Levando em consideração os líquidos, a densidade e a viscosidade são suas propriedades mais significativas, uma vez que são elas que interagem com os medidores de vazão. Outros fatores também podem importar, como o teor de pureza, composição das misturas, e até mesmo a condutividade, no caso de medidores eletromagnéticos. (BEGA *et.al.* 2011). (BEGA *et.al.* 2011).

2.5.1. DENSIDADE, OU MASSA ESPECÍFICA

A densidade absoluta dos líquidos, também chamada de massa específica, trata-se da medida da massa por unidade de volume, representado no sistema SI como kg/m³.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Sendo:

dm = Massa

dV = Volume

Na medição de vazão, a massa específica é uma propriedade de suma importância, uma vez que revela a quantidade exata de matéria presente em uma unidade de volume, o que é indispensável quando se trata de fluídos compressíveis.

Deve-se levar em consideração as condições de operação, como por exemplo a temperatura, pois está variável tem total influência sobre a densidade dos líquidos, uma vez que um aumento na temperatura provoca um aumento no volume e conseqüentemente uma redução na densidade. (BEGA *et.al.* 2011).

2.5.2. VISCOSIDADE

A viscosidade trata-se da medida de resistência ao escoamento de um fluído em uma secção determinada, provocando uma perda de carga, e deve ser considerada na medição. Basicamente, é possível mensurar a viscosidade de um fluído medindo as forças de arraste entre duas placas paralelas, onde entre elas esteja o fluído a ser aferido.

$$F = \mu A \frac{v}{y}$$

A força (F) necessária para conservar a placa superior em movimento e em uma velocidade constante v_0 é mostrada na equação acima, da qual v_0 é proporcional à área da placa multiplicado por v/y , sendo v a velocidade média do escoamento e y a distância entre as placas, como se mostra na Figura 2.

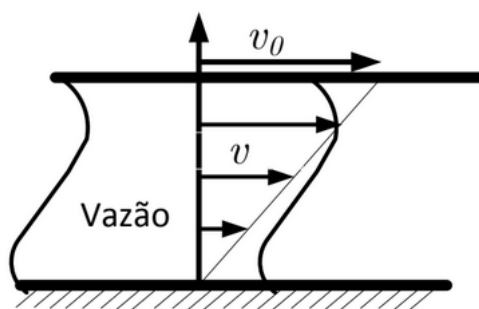


Figura 4 - Viscosidade, pela força de arraste.

Fonte: “Viscosidade, turbulência e tensão superficial” (BERTULANI, C., 1999).

A constante de proporcionalidade μ é chamada de viscosidade dinâmica, expressa em pascal-segundo (Pa.s), ou newton-segundo por metro quadrado (N.s/m²) em unidade do SI.

Temos também a viscosidade cinemática que trata-se da viscosidade dinâmica dividida pela densidade do fluido.

$$V = \frac{\mu}{\rho}$$

A temperatura de operação também tem influência sobre a viscosidade, uma vez que o aumento da temperatura nos líquidos provoca a diminuição da viscosidade, e a diminuição da temperatura aumenta a viscosidade dos líquidos. A pressão também deve ser mensurada, uma vez que o aumento da pressão aumenta a viscosidade dos líquidos, sendo que o contrário também é válido. (BERTULANI, C., 1999).

2.5.3. NÚMERO DE REYNOLDS

O Número de Reynolds é a relação entre as forças inerciais e as forças viscosas. De forma simplificada o número de Reynolds é um número adimensional, que permite avaliar o tipo do escoamento quanto a estabilidade do fluxo, podendo determinar se flui de forma laminar ou turbulenta. Criado por Osborne Reynolds, que determinou que a natureza da vazão em uma tubulação qualquer além de poder ser laminar ou turbulenta, tem seu padrão de escoamento diretamente ligado a variáveis como: diâmetro do tubo, massa específica, viscosidade do fluido e velocidade do fluido. Como podemos ver na equação a seguir:

$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu}$$

Sendo:

D = Diâmetro do tubo

v = Velocidade de escoamento do fluido

ρ = Massa específica do fluido

μ = Viscosidade do fluido

O Número de Reynolds é inversamente proporcional a viscosidade, uma vez que ele é tido como a relação das forças dinâmicas da vazão mássica com a tensão de cisalhamento gerada pela viscosidade. Sendo assim, fluídos que possuem grande viscosidade, apresentam Número

de Reynolds pequeno, o que ocasiona um escoamento laminar, caso a viscosidade seja pequena, o número de Reynolds é alto, gerando um escoamento turbulento. Assim:

Número de Reynolds < 2000 = Vazão laminar.

Número de Reynolds > 2400 = Vazão turbulenta. (CASSIOLATO et.al. 2008).

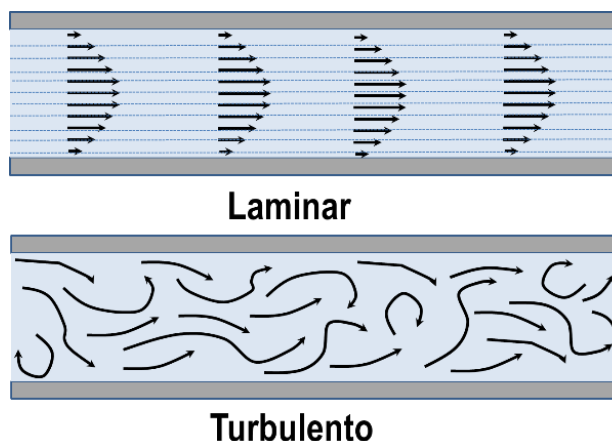


Figura 5 - Regime turbulento e regime laminar.

Fonte: Tecnoindustria (2018)

2.6.TIPOS DE MEDIDORES DE VAZÃO

Os medidores de vazão em si, podem ser classificados de várias formas. Podemos observar abaixo uma tabela que classifica os medidores por seus princípios de medição.

Tabela 3 - Classificação dos medidores de vazão.

Medidores de Vazão					
Geradores de Δp		Medidores lineares		Volumétricos	Em canais abertos
Placa	T	Área variável	Λ	Diafragma	G Calhas
Bocal	T	Coriolis	Λ	Disco de natação	L Vertedouros
Venturi	T	Eletromagnético	LC	Palheta	L
		Térmico	Λ	Pistão oscilante	
Inserção		Turbina	T	Pistões recíprocos	L
- Pitot	T	Ultrassônico	T		
- Pitot de medida	T	Vórtice	T	Rotor	
				- Lóbulo	G
Especiais		Medidores especiais		- Engrenagem	L
- Centrífugos	A			- Semi-imerso	G
- Laminares	G	Força	Λ		
		Correlação	E		
		Laser	G		

Fonte: Livro Instrumentação Industrial (BEGA et.al. 2011).

Sendo sua compatibilidade:

T = Líquidos, gases e vapor;

G = Medição exclusiva de gases;

L = Medição exclusiva de líquidos;

LC = Medição exclusiva de líquidos condutores de eletricidade;

Λ = Indica que não é utilizado para vapores, com exceções;

E = Líquidos com sólidos em suspensão.

Cada princípio de funcionamento possui propriedades e limitações próprias, que limitam sua utilização a um certo intervalo de diâmetros, temperaturas, pressões, viscosidades e teores de pureza. Da qual, para selecionar um tipo de medidor de vazão para uma certa atividade, deverá ser levado em consideração também a perda de carga gerada na tubulação da qual este equipamento está inserido, os comprimentos de trechos retos disponíveis, o valor disponível para investir, bem como os custos de manutenções preventivas e/ou corretivas. (BEGA *et.al.* 2011).

Podemos classificar ainda os medidores de vazão entre medidores indiretos, medidores diretos, e medidores especiais, como descrito no esquema abaixo. Porém neste trabalho serão apresentados apenas os métodos mais sofisticados, e de maior uso na empresa devido sua maior confiabilidade.

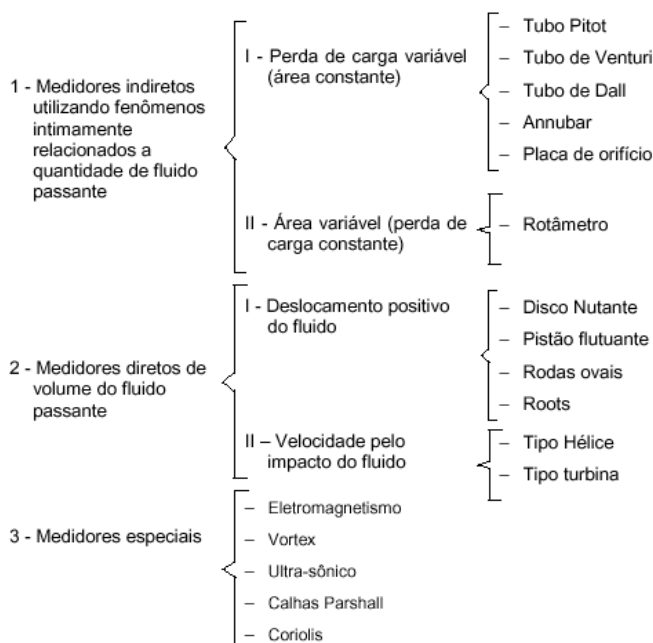


Figura 6 – Classificação dos medidores.

Fonte: Livro Instrumentação Industrial (BEGA *et.al.* 2011).

2.6.1. MEDIDORES VORTEX

Também chamado de vórtices, o fenômeno utilizado neste método de medição foi estudado inicialmente por Leonardo da Vinci, no séc. XVI e depois por Von Kármán em 1912. Estudado primeiramente com o intuito de prevenir acidentes como destruição de pontes e chaminés, da qual na segunda metade do séc. XX começou a ser utilizado na medição de vazão.

Bernard T. Von Karman, renomado cientista e engenheiro aeronáutico notou que objetos de formas cilíndricas e circulares apresentavam um fenômeno particularmente interessante quando opostos a um escoamento de fluido. Da qual em velocidades baixas, as linhas fluidas acompanham a forma do objeto, não gerando vórtices. Por outro lado, com o aumento da velocidade, as linhas deixam de acompanhar o formato do obstáculo, arredando-se de seu contorno. Tal separação provoca com o aumento da velocidade, áreas de baixa pressão e a ruptura da camada-limite por isso aparecem os vórtices.

Sendo que frequência dos vórtices criados é diretamente proporcional à velocidade de fluxo do fluente, e estes se alternam a jusante do obstáculo. Já em regime turbulento, o volume de um vórtice não depende da velocidade do fluido. Sendo assim, em tais circunstâncias a vazão é correspondente à frequência dos vórtices. Vale ressaltar que tal comportamento não depende da densidade, viscosidade, ou se trata-se de um gás, líquido ou até mesmo vapor. Sendo assim para obtermos uma linearidade entre a frequência dos vórtices e a velocidade, o regime de escoamento deve ser turbulento.

Em forma resumida, este fenômeno define que para a maioria dos obstáculos, quando existe um aumento da velocidade, o número de vórtices em um certo período aumenta de forma diretamente proporcional.

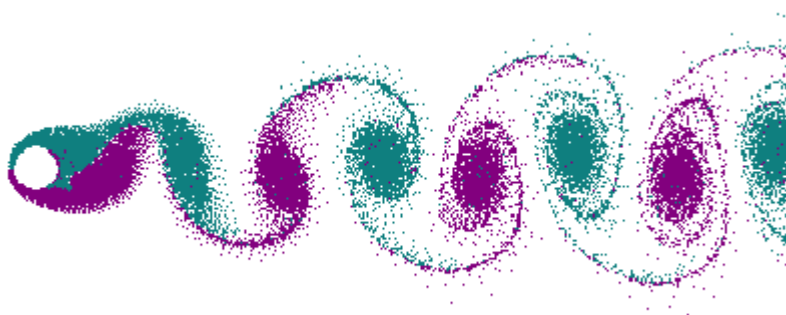


Figura 7 - Um objeto circular, oposto ao fluxo gerando vórtices de Von Karman.

Fonte: GONÇALVES.

Tal fenômeno é a base de funcionamento dos medidores do tipo vortex, da qual apresentam um obstáculo disposto de forma perpendicular ao eixo, que se opõe ao avanço do fluido. Podendo ser de lado a lado do tubo de medição, ou na forma de um anteparo local.

Os vórtices alternados são gerados nos lados do corpo, sendo que a base de medição se dá através da aferição da frequência dos vórtices que é diretamente proporcional à velocidade do escoamento. Algumas das técnicas utilizadas para medir a frequência dos vórtices são por um anemômetro de fio quente, ultrassônico, por variação da pressão local, transdutores piezoelétricos, entre outros.

De forma mais simples, o medidor apresenta por exemplo dois sensores, piezoelétricos. Quando o fluido atinge o obstáculo se separa formando os vórtices alternados. Os vórtices alternadamente geram um diferencial de pressão na barreira, da qual os sensores piezoelétricos irão gerar um sinal elétrico de maneira proporcional ao esforço mecânico alternado imposto pelos vórtices no obstáculo.

Os sensores dispostos no obstáculo sofrem influência da região de elevada pressão anterior a formação dos vórtices e da zona de baixa pressão logo após a formação dos vórtices. A barra possui um pequeno grau de passagem livre, possibilitando assim o pequeno deslocamento, propagando o movimento para os sensores por meio de esforços mecânicos nos mesmos.

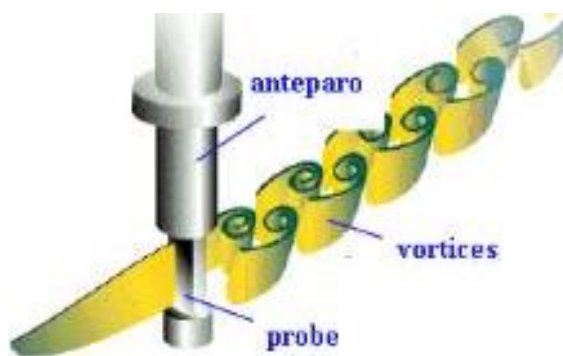


Figura 8 - Esquema de obstáculo gerando vórtices no medidor.

Fonte: GONÇALVES.

Os sensores convertem o estresse mecânico em pulsos elétricos para estimar a frequência dos vórtices. Por intermédio dos pulsos elétricos dos sensores, é possível determinar a frequência dos vórtices, sendo assim a frequência é convertida digitalmente, por proporção, em medidas de velocidade. Tendo posse do valor da velocidade, pela convergência do Número

de Strouhal, é multiplicada pela área do tubo do medidor para se ter a vazão volumétrica. Como apresentado nas equações a seguir:

$$St = \frac{f \cdot d}{v} \quad Q = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot f \cdot d}{4 \cdot St}$$

Sendo

St = Número de Strouhal;

f = Frequência dos vórtices;

d = Diâmetro do obstáculo;

v = Velocidade;

D = Diâmetro do tubo. (GONÇALVES 2004).



Figura 9 - Medidor de vazão vortex.

Fonte: GONÇALVES.

2.6.2. MEDIDORES TURBINA

Utilizados nas medições de líquidos e gases, os medidores de vazão do tipo turbina tem seu princípio de funcionamento baseado em um rotor munido de palhetas, instalado paralelo à direção do fluxo, que se põe a girar quando existe a vazão de um fluido. Isso se dá pois a velocidade do fluxo colide com as palhetas provocando assim uma rotação. Sua velocidade angular é proporcional à velocidade do escoamento, que por sua vez é diretamente proporcional à vazão do volume. Da qual um sistema mecânico ou eletrônico detecta a rotação da turbina, e sendo ele eletrônico gera pulsos.

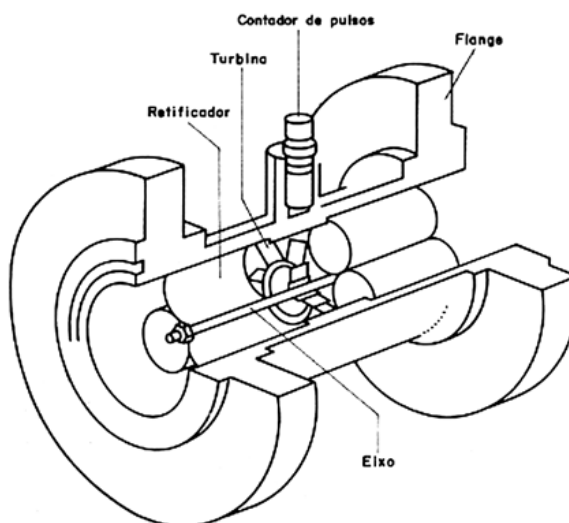


Figura 10 - Esquema medidor de vazão turbina.

Fonte: PUHLMANN.

Conta com um sensor magnético ou do tipo rádio frequência, instalado na parte externa do corpo do medidor, que não faz nenhum contato físico com o fluido, e detecta o movimento do rotor. As palhetas do rotor devem ser feitas de material magnético, pois assim na medida que cada uma passa perto do radar do sensor interrompe o campo magnético, gerando um pulso.

O sinal de saída emitido pelo sensor é uma sequência de pulsos em que cada pulso reproduz um pequeno volume determinado de líquido ou gás. Sendo este sinal linear à vazão. Por sua vez, os transdutores específicos são responsáveis por converter estes pulsos eletrônicos em unidades de vazão instantânea ou o volume totalizado. (INCONTROL)

O projeto e execução das turbinas necessita de um trabalho minucioso dentro de alguns cuidados, pois deve assegurar uma rotação livre de freadas por atrito ou força de arraste. Geralmente as turbinas são flangeadas, e são instaladas em um trecho de tubulação de comprimento adequado e reto.

Estes medidores são amplamente utilizados na indústria para totalizar o volume, visando apurar custos ou rendimento de seus produtos. Sucesso devido sua precisão na medida de vazão, sendo uma das mais altas encontradas em elementos primários, chegando a 0,25% do valor instantâneo. (BEGA *et.al.* 2011).



Figura 11 - Exemplo de medidor de vazão turbina.

Fonte: PUHLMANN.

2.6.3. MEDIDORES ELETROMAGNÉTICOS

Os medidores de vazão eletromagnéticos têm seu princípio de funcionamento na lei de Faraday a respeito dos estados de indução, que afirma que uma haste de metal que se movimenta em um campo magnético induz eletricidade.

Deste modo, quando partículas eletricamente carregadas de um fluido atravessam o campo magnético artificial provocado por duas bobinas em campo, acaba por induzir uma tensão elétrica. Obviamente, devido seu princípio de funcionamento exigir que o fluido conduza eletricidade, o medidor magnético só funciona em fluidos condutivos. O que não se aplica a gases por exemplo (GERÔNIMO).

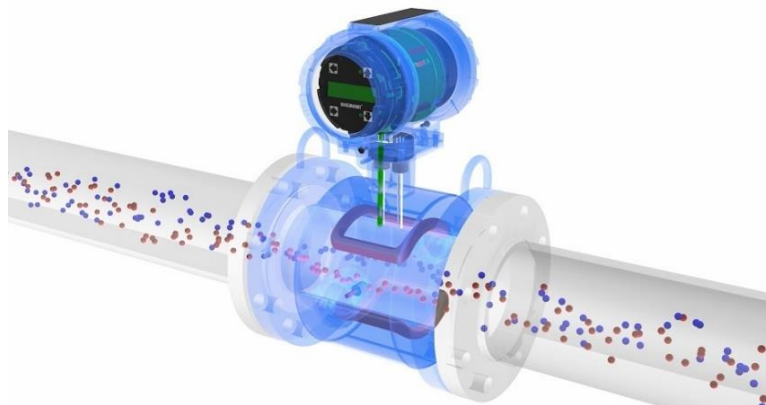


Figura 12 - Esquema medidor de vazão eletromagnético.

Fonte: EMERSON.

Explicando melhor sua estrutura, o medidor é composto por duas bobinas instaladas geralmente na parte de cima e na parte de baixo do tubo de medição. Conta também, com dois eletrodos, que são responsáveis por aferir a tensão induzida gerada. Apresenta um revestimento dos mais diversos materiais isolantes, que serve para isolar as bobinas.

Por sua vez, as bobinas são responsáveis por gerar um campo eletromagnético dentro do tubo de medição, e quando o fluido passa através deste campo eletromagnético criado, gera uma tensão que é medida com os eletrodos em ambas as laterais do medidor de vazão eletromagnético. Tal tensão induzida é diretamente proporcional a velocidade da vazão e ao volume da vazão.

Geralmente medidores de vazão magnéticos fazem medição volumétrica. Porém existem alguns casos de medição mássica com aplicação deste tipo de medidor. Nestas modalidades para o medidor efetuar o cálculo de massa é necessário que ele possua a possibilidade de receber o valor de densidade do fluido a ser medido. Tendo posse destes parâmetros é capaz de calcular a vazão de escoamento do fluido aplicado (EMERSON).

2.6.4. MEDIDORES ULTRASSÔNICOS

Estes medidores baseados na tecnologia de ultrassom foram criados na segunda metade do século XX, para serem utilizados nas indústrias. Sua aplicação se dá desde os anos 1960, que teve um início discriminado por parte de um marketing abusivo feito por fabricantes inexperientes. Deste modo, medidores ultrassônicos de boa qualidade só vieram a ser comercializados cerca de 20 anos depois. Podem utilizar de dois princípios de funcionamento, o efeito Doppler ou o método de tempo de trânsito.

Os medidores de vazão ultrassônicos Doppler baseiam-se no princípio chamado Efeito Doppler, que foi documentado pelo físico e matemático austríaco Christian Johan Doppler em 1842. Ele afirmou que as frequências das ondas sonoras recebidas por um observador dependem do movimento da fonte ou do observador em relação à fonte do som. (OMEGA).

Em sua estrutura, os medidores de vazão ultrassônicos por efeito Doppler contam com um transdutor que emite um feixe ultrassônico no escoamento do tubo. Deste modo, para que o medidor de vazão possa atuar, é preciso que tenha partículas sólidas ou bolhas de ar no fluxo para refletir o raio ultrassônico. Sendo assim, a movimentação das partículas muda a frequência do feixe captado por um segundo transdutor.

Como já explicado, este tipo de medidor de vazão afere a alteração de frequência que é linearmente proporcional à vazão do fluido, sendo assim possível calcular a vazão do mesmo.

Já pelo método de tempo de trânsito, aferem a diferença de que o sinal emitido pelo primeiro transdutor demora para percorrer o tubo e chegar até o segundo transdutor. Munido deste dado, faz-se um comparativo entre as medições adquiridas a montante e a jusante da vazão. De forma que se não há vazão, o tempo de deslocamento do sinal será o mesmo nas duas direções, caso contrário, o som se movimenta mais rápido quando viaja o tubo na mesma direção da vazão e mais lento quando viaja o tubo em sentido contrário à vazão.

Sendo que o sinal ultrassônico deve transpor o tubo para ser auferido pelo sensor, o líquido não pode possuir quantidades altas de sólidos ou bolhas, pois assim o som de alta frequência reduz e fica muito escasso para percorrer o tubo.

Uma vez que a velocidade da vazão do fluido é linearmente proporcional à diferença entre as medições a montante e a jusante, se faz possível calcular a vazão do fluido em questão (OMEGA).



Figura 13 - Medidor ultrassônico.

Fonte: DSW.

2.6.5. MEDIDOR CORIOLIS

O medidor mássico Coriolis é um instrumento medidor de vazão que tem seu princípio de funcionamento da medição da oscilação (vibração) de um tubo localizado na parte de dentro do medidor. Isso se dá através da aplicação o princípio de Coriolis que se trata de uma técnica dinâmica, da qual se gera um sinal proporcional a vazão mássica.

Este método é praticamente não depende das propriedades do fluído, como por exemplo condutividade, pressão, viscosidade ou temperatura e também pode ser utilizada para medir a densidade do fluído. Devido sua versatilidade e precisão, estes medidores atendem a os mais variados processos, atuando tanto medição de líquidos quanto de gases. Seja nas indústrias petroquímica, químicas, farmacêuticas, alimentícias e outros laboratórios industriais.

Para melhor compreender o funcionamento deste medidor, devemos iniciar fazendo uma revisão a respeito do efeito Coriolis.

Gaspard observou através dos princípios de movimento mecânico, que na medida em que um fluido se move por uma tubulação vibrante ele tende a se aproximar do ponto de maior amplitude senoidal quando está em regime de aceleração. Sendo válido também o contrário, ou seja, o fluído em desaceleração tende a se afastar do ponto de maior amplitude senoidal. Esta oscilação é percebida em forma de distância dos sensores eletromagnéticos que por sua vez geram uma informação proporcional a vazão mássica do instrumento. (BEGA *et.al.* 2011).

Gaspard Coriolis, engenheiro e matemático francês, definiu no início do séc. XIX que uma massa m movimentando-se com velocidade relativa \vec{V}_r em relação a um sistema desenvolvendo um movimento de rotação $\vec{\Omega}$, é sujeitado a uma força \vec{f}_c de acordo com a equação abaixo:

$$\vec{f}_c = 2m \cdot \vec{\Omega} \times \vec{V}_r$$

Sendo que \times representa produto vetorial.

Deste modo à força \vec{f}_c foi nomeada força de Coriolis.

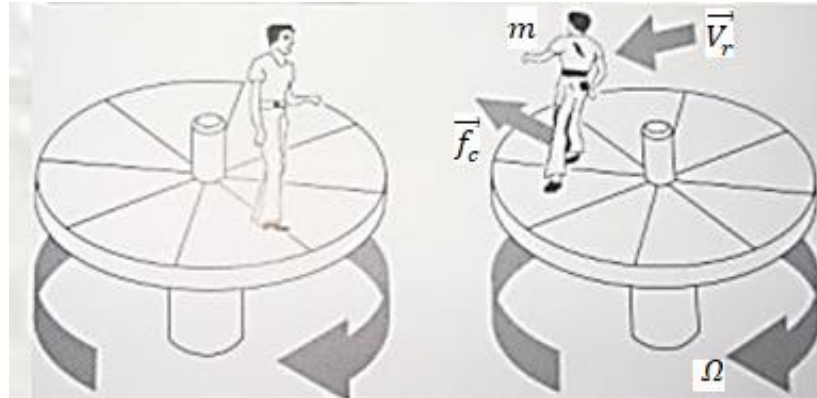


Figura 14 - Ilustração do efeito Coriolis.

Fonte: SANTANA, Andrielle C.

Explicando então de maneira física, podemos ver através da figura 15 que a vazão da tubulação principal se divide em dois tubos paralelos em forma de “U” que apresentam diâmetros menores que a tubulação de entrada. No final desses tubos a vazão volta a ser conduzida por um único tubo de saída. Esta dupla de tubos em “U” são excitados permanentemente com uma frequência conhecida, esta excitação se dá por conta de uma bobina de excitação, como mostra a figura. Tal excitação faz os dois tubos se moverem em frequências naturais de vibração, e com baixa amplitude (FMC 2005).

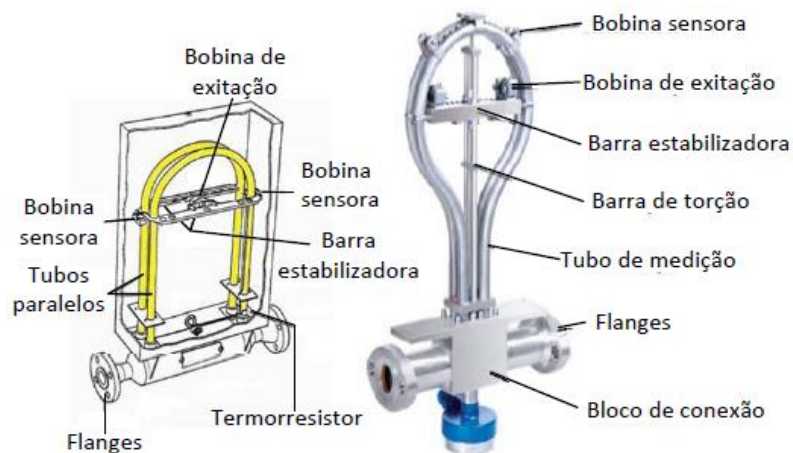


Figura 15 - Partes do medidor Coriolis.

Fonte: Mecatrônica Atual.

Sendo assim, o escoamento do fluido no interior dos tubos altera a frequência natural de oscilação de forma proporcional à massa específica do fluido, como podemos ver na figura 16.

Deste modo, a partir da frequência de oscilação é possível definir a massa específica deste fluido.

Outro ponto importante é que a circulação da massa do fluido no interior do medidor gera uma força de Coriolis, que provoca uma torção nos tubos, como podemos ver na ilustração da figura 16. Tal torção é captada através das bobinas sensores (ou bobinas captoras) acopladas nas extremidades retas dos tubos em “U” e é proporcional à vazão mássica.

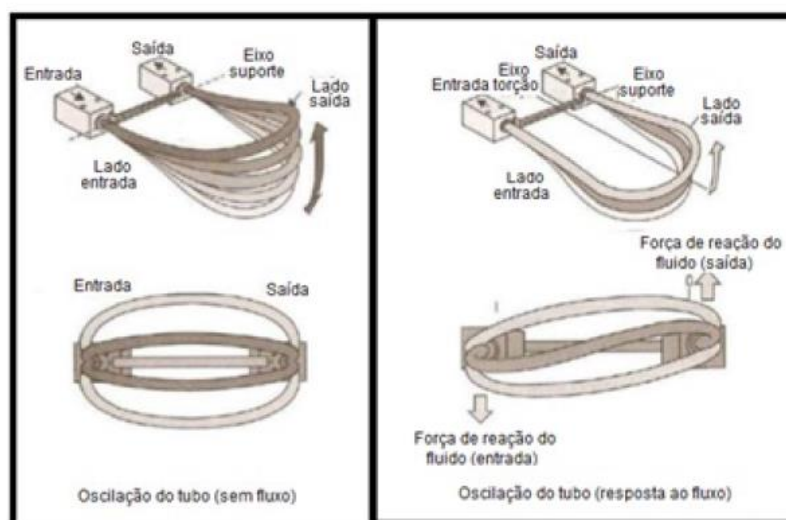


Figura 16 - Deformação dos tubos de acordo com a vazão

Fonte: Mecânica dos fluídos.

Deste modo as bobinas sensores são capazes de gerar tensões em formato de ondas senoidais, como consta na imagem 17, sendo representado por “entrada” o sinal do sensor na entrada do tubo do medidor e por “saída” o sinal do sensor na saída do medidor. E a parte mais importante, o sinal indicado como “resposta do medidor” trata-se da subtração entre o sinal de saída e o sinal de entrada, que é diretamente proporcional à defasagem entre esses sinais, sendo assim este é o sinal de resposta da vazão em si. (FMC 2005).

O tempo de atraso entre as duas ondas senoidais, aferidas nas bobinas sensores, é calculado em microssegundos e representado por Δt . Tal parâmetro é diretamente proporcional à vazão mássica, ou seja, quanto maior o Δt gerado pela força Coriolis, maior a vazão mássica.

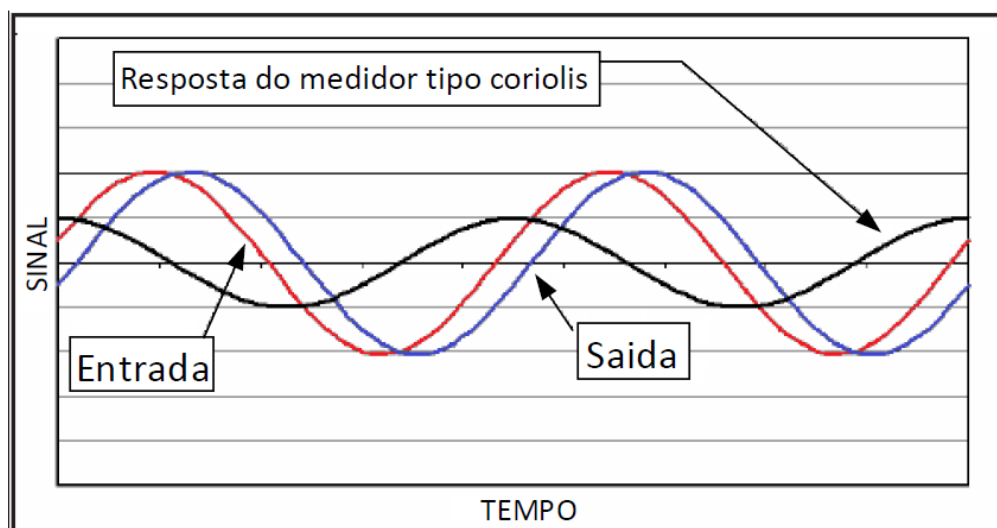


Figura 17 - Ondas senoidais detectadas.

Fonte: FMC ENERGY SYSTEMS.

Um termorresistor montado nos tubos em U, monitora a temperatura do fluido, na finalidade de compensar as variações das deformações elásticas sofridas pelos tubos com a variação da temperatura (Smart Measurement, 2016).

2.7.PRINCIPAIS MÉTODOS DE TESTES DE CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES DE VAZÃO

2.7.1. MÉTODO VOLUMÉTRICO

Este método consiste em uma comparação do valor medido pelo medidor de vazão a ser calibrado com o volume dado pelo nível de um reservatório volumétrico em razão do tempo. A base do método, se dá de acordo com a norma ISO 8316 (1987), resume-se em:

1. Definir o volume de início do tanque volumétrico;
2. Deslocar a vazão com o difusor para o tanque volumétrico e zerar o cronômetro;
3. Determinar o volume final contido no tanque volumétrico.

Como mostra a imagem a seguir:

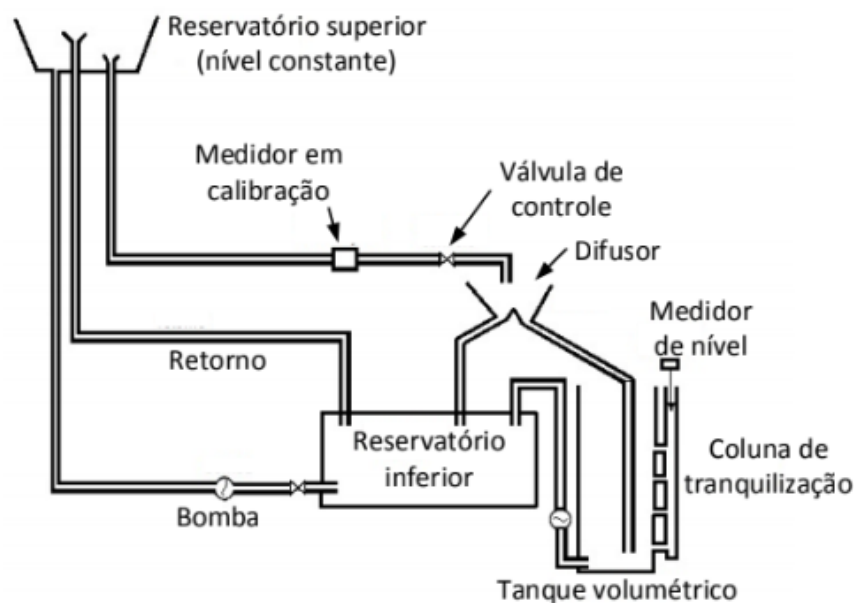


Figura 18 - Esquema de calibração pelo método volumétrico.

Fonte: INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION

Deste modo, a vazão volumétrica (Q_v) é definida pela razão do volume coletado (dV) de acordo com o tempo de aquisição (dt). O tempo de drenagem é basicamente o tempo necessário para esvaziar o tanque.

Podemos ver na equação a seguir:

$$Q_v = \frac{dV}{dt} = \frac{V_f - V_i}{t_f - t_i}$$

Onde

V_i = Volume inicial

V_f = Volume obtido no fim da coleta

t_i = Tempo de início de ensaio

t_f = Tempo final do ensaio.

Tendo posse destes testes, este valor é então comparado com o valor apontado pelo medidor a ser calibrado.

2.7.2. MÉTODO GRAVIMÉTRICO

Método que consiste em comparar o valor indicado pelo medidor a ser calibrado com o valor mássico apontado por uma balança ou célula de carga em função do tempo.

Para efetuar este método, temos duas possibilidades:

Por média da vazão mássica:

$$Q_m = \frac{m_{REF}}{t_{MED}}$$

Por massa totalizada:

$$m = \int_0^{t_{MED}} Q_m(t) dt = Q_m \cdot t_{MED}$$

Onde:

m_{REF} = Massa referencial, determinada pela pesagem

t_{MED} = Tempo de coleta medido.

O método gravimétrico, conforme a norma ISO 4185 (1980), é feito através dos seguintes passos:

1. Determinar a massa de início
2. Desviar a vazão para o tanque de pesagem, com o uso do difusor
3. Determinar a massa final disposta no tanque.

(INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1987).

Como podemos ver na imagem a seguir:

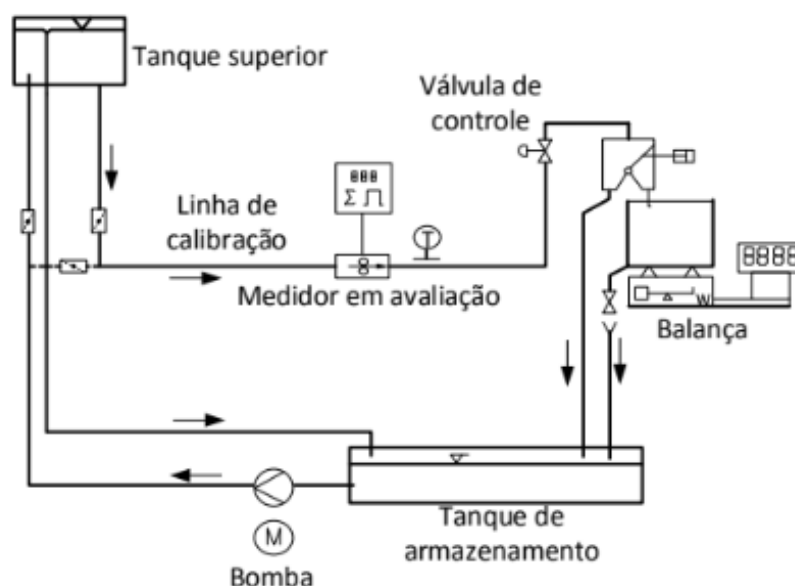


Figura 19 - Esquema de calibração pelo método gravimétrico.

Fonte: INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION

2.7.3. MÉTODO MEDIDOR MESTRE

Este método consiste em utilizar como padrão um medidor de incerteza conhecida e previamente calibrado, denominado medidor mestre. Desde modo, o medidor a ser testado são conectados em série, de modo que a vazão que passará por ambos seja a mesma. Sendo assim, deve-se confrontar o valor aferido pelo medidor a ser calibrado, com o medidor padrão. Segundo a norma ISO 7278-1 (1987), é importante que o medidor mestre seja calibrado periodicamente, para manter sua exatidão e baixa incerteza (Paulo, 2015).

Como podemos ver na imagem a seguir:

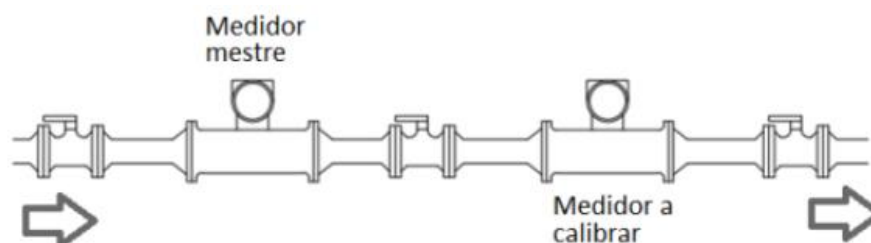


Figura 20 - Esquema de calibração pelo método medidor mestre.

Fonte: adaptado de Portal Instrumentos, PAULO

2.8. A INDÚSTRIA QUÍMICA

Como exemplo, as indústrias químicas necessitam de um alto controle de suas variáveis de processos, sendo a vazão uma das mais importantes devido a transposição de líquidos entre pontos das plantas, e também pela necessidade de um ajuste fino no controle das dosagens e envases de matéria prima (BEGA *et.al.* 2011).,

Temos como exemplo uma indústria química manufatureira e distribuidora multinacional fundada em Israel, presente em mais de 120 países. Que foi fundada através da junção, em 1997, das companhias Makhteshim e Agan.



Figura 21 - Indústria Química de Taquari - RS

Fonte: RBS

Uma empresa tão conceituada no mercado mundial apresenta dificuldades em sua filial de Taquari quando o assunto é aferição de calibração de medidores de vazão, pois não possui um local apropriado para efetuar seus testes. Deste modo acaba por depender que empresas terceirizadas busquem os equipamentos e levem para suas sedes para assim poderem efetuar os devidos testes e calibrações. Isso acarreta custos, e tempos de parada em suas linhas de produção.

Citando primeiramente a perda com custos de testes calibração em si, em uma conta rápida podemos constatar que sendo 42 medidores, e sendo o custo individual dos serviços de testes de calibração como R\$ 460,00, temos um gasto anual de R\$ 19.320,00 (segundo dados fornecidos pela empresa, 2019). Caso existisse uma bancada de testes de calibração para estes

equipamentos, seria necessário apenas custear o valor de um funcionário, contratado por hora, especializado em instrumentação, que atualmente está contratado por R\$ 58,00 por hora, disponível 8,8 horas por dia na empresa. Em média o tempo de um teste de calibração de um instrumento de medição de vazão, sem tirá-lo da empresa seria de 1 hora, sendo assim seriam gastas 42 horas por ano em aferições de calibração, utilizando dos serviços de um funcionário prestador de serviço, resultando em um gasto anual de apenas R\$ 2.436,00, o que gera uma economia de R\$ 16.884,00 anuais para a empresa.

Em outro ponto de vista, a empresa utiliza matérias primas muito caras em sua produção, como por exemplo a matéria prima M325, seu preço é de 81,25 USD por kg, convertendo para moeda nacional temos algo em torno de R\$ 330,03 por quilo deste produto (segundo dados fornecidos pela empresa, 2019). O M325 é diluído no processo, e utilizado na produção do *Picoxy*, passando em sua linha diariamente milhares de litros, que são aferidos por medidores de vazão. Caso ocorra uma falha de dosagem, com excesso ou falta deste componente químico, devido a um erro de calibração no medidor de vazão responsável, teríamos o comprometimento e perda de um lote inteiro, ocasionando uma despesa de milhões de reais para a empresa.

Deste modo, se faz claro a importância de possuir a disposição uma bancada de testes e calibração de medidores de vazão. Pensando na falta que este equipamento faz, e os danos que seria capaz de impedir, se faz necessário implementar, juntamente com a equipe de manutenção da empresa, um projeto capaz de suprir tais necessidades, de maneira eficiente. (EMPRESA, 2019).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Será utilizado um sensor Coriolis de medição de vazão, da marca *Micro Motion*, modelo F200S, com tubulação de entrada de 2” conforme foto abaixo. Com sua calibração aferida e certificada.



Figura 22 - Medidor Coriolis utilizado no projeto.

Fonte: Do autor.

Integrado a este sensor, será utilizado um transmissor de vazão, também da marca *Micro Motion*, de modelo 1700R conforme a imagem abaixo.



Figura 23 - Transmissor utilizado no projeto.

Fonte: Do autor.

Foi utilizado um motor reaproveitado da marca *WEG*, modelo 90 L, de 3CV e 1730 RPM. Conforme especificações técnicas abaixo.

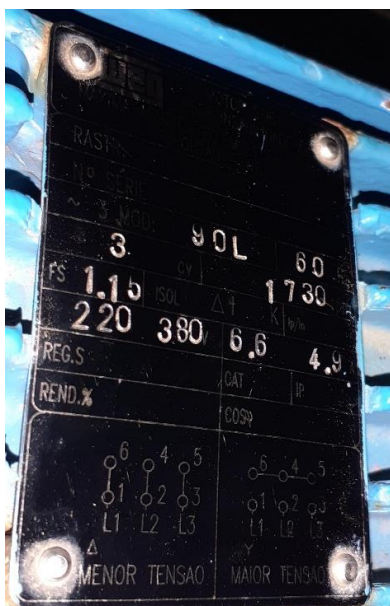


Figura 24 - Motor utilizado no projeto.

Fonte: Do autor.

Integrado a este motor, para termos a vazão do projeto, teremos uma bomba centrífuga reaproveitada da marca *Goulds*, modelo 3196 ST de 1750 RPM. Conforme gráfico de vazão abaixo.

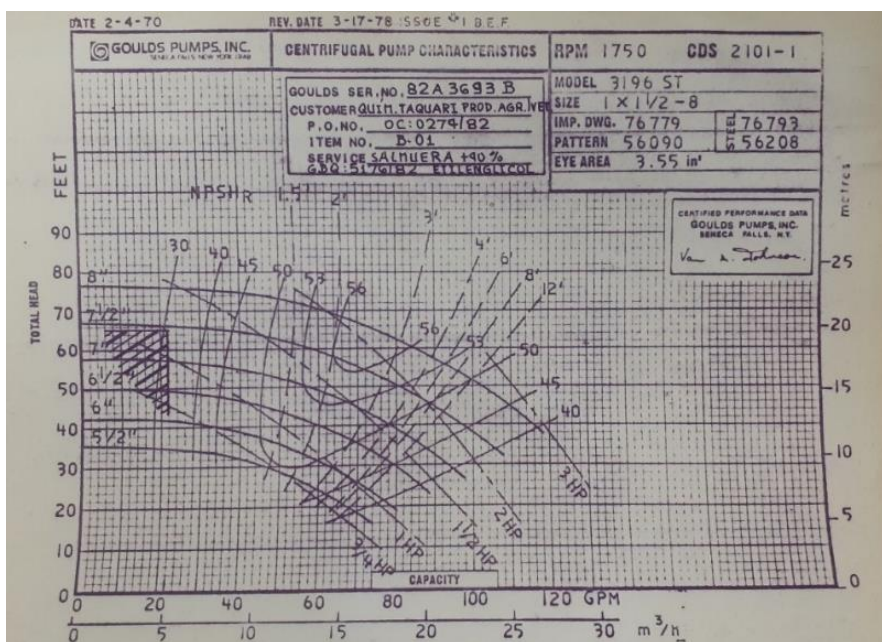


Figura 25 – Dados da bomba utilizada no projeto.

Fonte: *Goulds*.

Para a montagem deste conjunto motor bomba, foi utilizada uma base de aço, reaproveitada e adaptada. Conforme foto abaixo.



Figura 26 - Base para motor e bomba utilizada no projeto, antes da reforma.

Fonte: Do autor.

O projeto foi montado em cima de um carrinho de 4 rodas, para possibilitar o transporte da bancada de testes. Conforme foto abaixo, o carrinho estava posto para descarte, e foi reformado.



Figura 27 - Carrinho utilizado no projeto, antes da reforma.

Fonte: Do autor.

Utilizou-se também um tanque, da qual será o reservatório de água para testes, sendo assim, será utilizado um tanque de polímero de 350 L, conforme foto abaixo.



Figura 28 - Tanque de 350 L utilizado no projeto.

Fonte: Do autor.

3.1.CUSTOS DOS MATERIAIS

Tabela 4 - Orçamento do projeto.

Material	Valor
Sensor Micro Motion	R\$ 50.000,00
Transmissor Micro Motion	R\$ 8.000,00
Motor WEG	R\$ 1.800,00
Inversor de frequência Allen-Bradley	R\$ 3.350,00
Bomba Goulds	R\$ 10.000,00
Tanque	R\$ 230,00
Carrinho e estruturas	R\$ 600,00
Caixa quadro para Painei	R\$ 105,00
Tubulações	R\$ 1.172,36
Válvula 2"	R\$ 561,21
Chapas de aço carbono	R\$ 320,00
Mão de obra	R\$ 2.500,00
TOTAL	R\$78.638,57

Fonte: Do autor.

3.2.METODOS

A bancada de testes foi montada sob a estrutura de um carrinho de carga para possibilitar a mobilidade de maneira que possa ser levado e utilizado na planta, no local onde está o medidor. Sua tubulação de conexão será feita em mangotes, para flexibilizar o acesso.

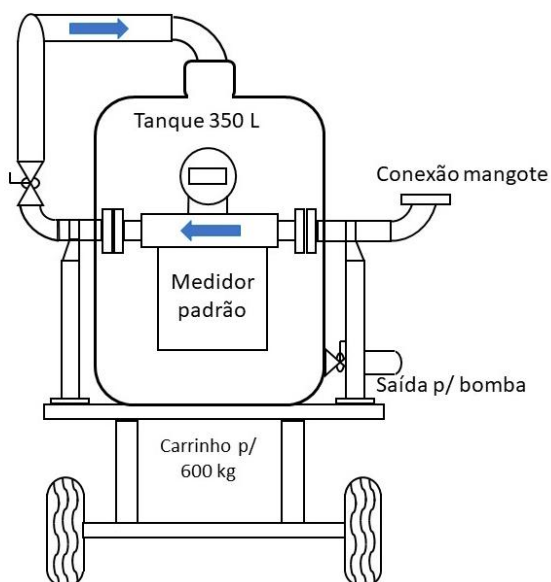


Figura 31 - Visão frontal do projeto.

Fonte: Do autor.

O método escolhido para o projeto é o método medidor mestre, da qual será instalado o medidor a ser testado em série com um medidor mássico Coriolis calibrado e de alta confiabilidade, conforme a malha apresentada abaixo.

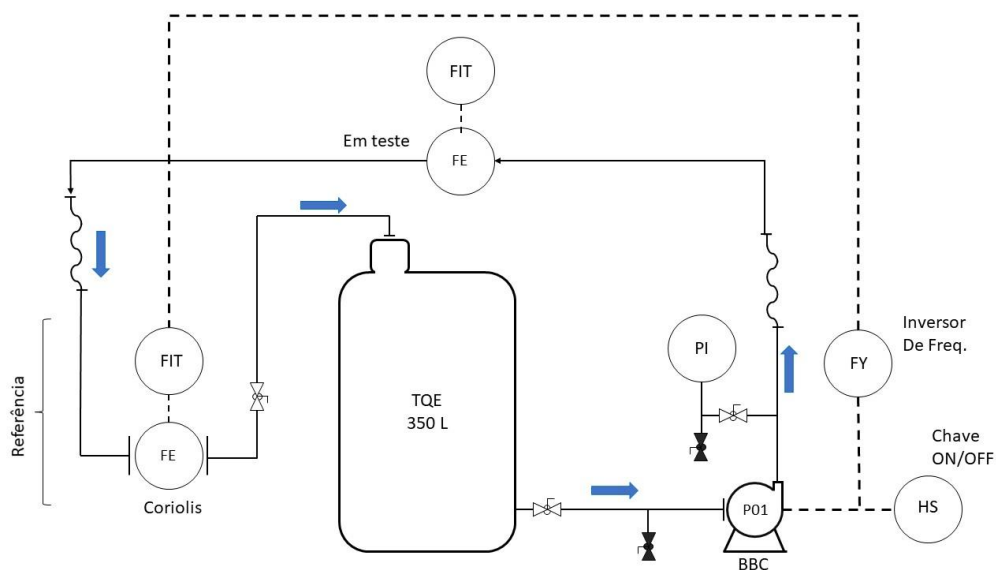


Figura 29 - Malha de instrumentos do projeto.

Fonte: Do autor.

Como mostra a figura 29, o projeto funciona em circuito fechado, da qual a bomba retira água do tanque fazendo circular pelas tubulações, passa pelo medidor a ser testado e na sequência em série a água passa também pelo medidor mestre e por fim retorna ao tanque.

Contamos também com uma derivação que possui um manômetro e uma válvula, da qual será utilizado para purgar o ar da tubulação. E um dreno entre o tanque e a bomba, para poder esvaziar o tanque quando necessário. Como podemos ver melhor na imagem a seguir.

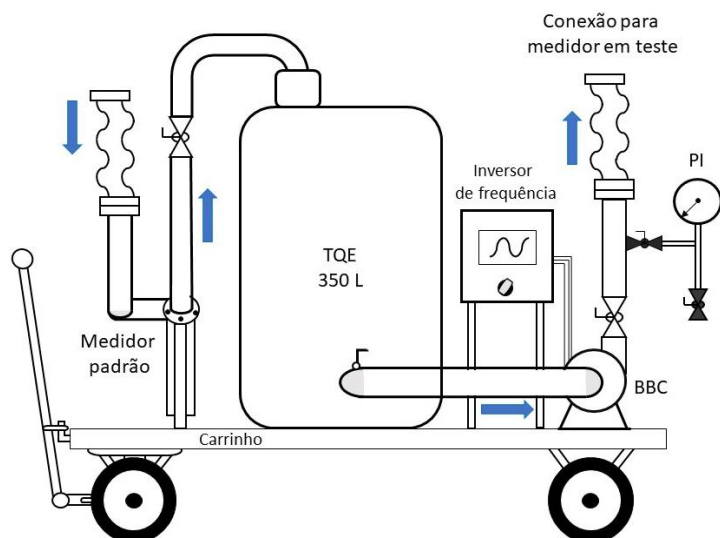


Figura 30 - Visão lateral do carrinho.

Fonte: Do autor.

O esquema do motor e da bomba pode ser visto melhor na vista superior a seguir.

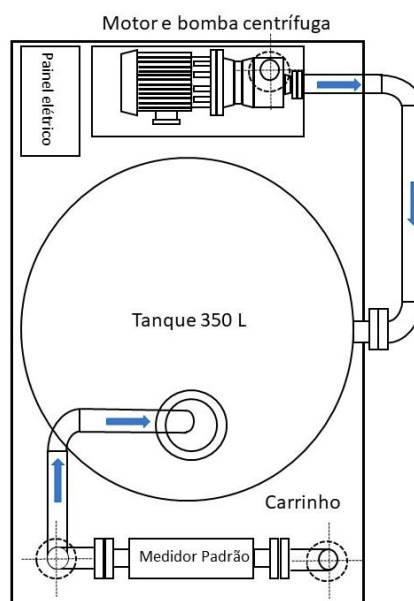


Figura 31 - Vista superior do projeto.

Fonte: Do autor.

Como podemos ver no esquema abaixo, contamos com um painel elétrico, que conta com um inversor de frequência que servirá para controlar a frequência do motor, e consequentemente a vazão da bomba, para finalidade de variar a medição. Ou seja, com o aumento da frequência do motor, ele desempenhará maior velocidade de giro, e consequentemente desempenhará maior vazão na bomba.

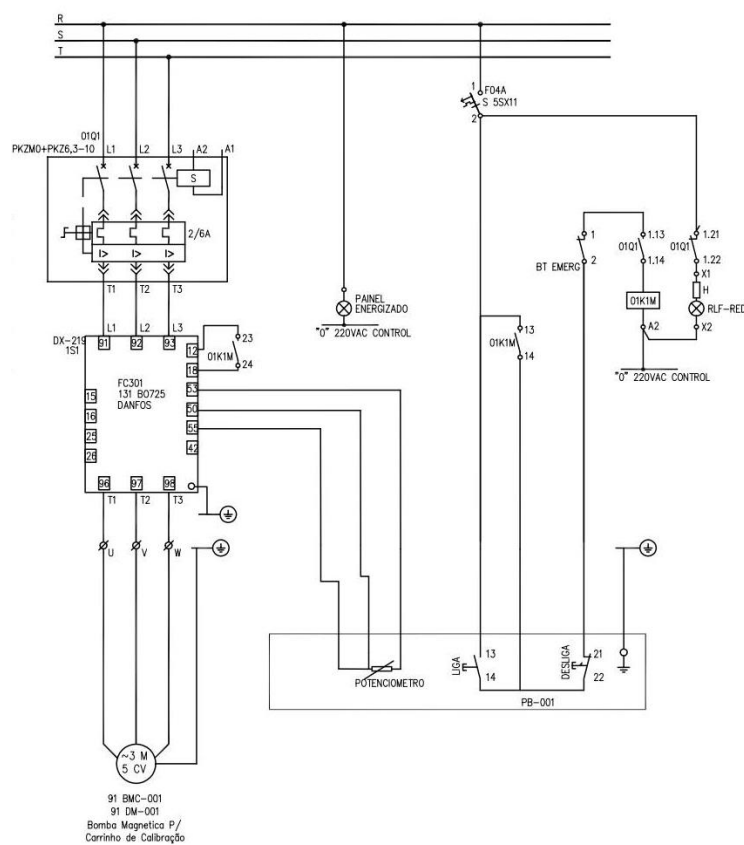


Figura 32 - Esquema elétrico.

Fonte: Do autor.

3.3. MONTAGEM FÍSICA

A execução do projeto iniciou pela montagem do conjunto bomba e motor na base escolhida, possibilitando ser conectado a um inversor de frequência auxiliar para testar seu funcionamento, obtendo êxito. Com o conjunto montado, foi possível efetuar também um teste de circulação da água do tanque fazendo uso da bomba.



Figura 33 - Motor e bomba montados.

Fonte: Do autor.

A estrutura do carrinho foi reformada, recebendo uma chapa de aço carbono em forma de bacia e um kit de rodas com especificação para 150 kg cada uma.



Figura 34 - Reforma do carrinho iniciada.

Fonte: Do autor.

O medidor de vazão padrão foi enviado para aferição de calibração na filial de Londrina – PR. Da qual recebeu um certificado de aferição de calibração via software CMX Versão: 2.10, como aprovado conforme a ISO 9000, e de rastreabilidade ACCILAB 11833-8.

Apresentando um erro máximo de -0,049 % da leitura, conforme imagens a seguir. Em uma temperatura ambiente de 29,5 °C, e umidade de 34%. Sendo que certificado em si não pode ser inteiramente reproduzido devido a política de confidencialidade de procedimentos e documentos da empresa.

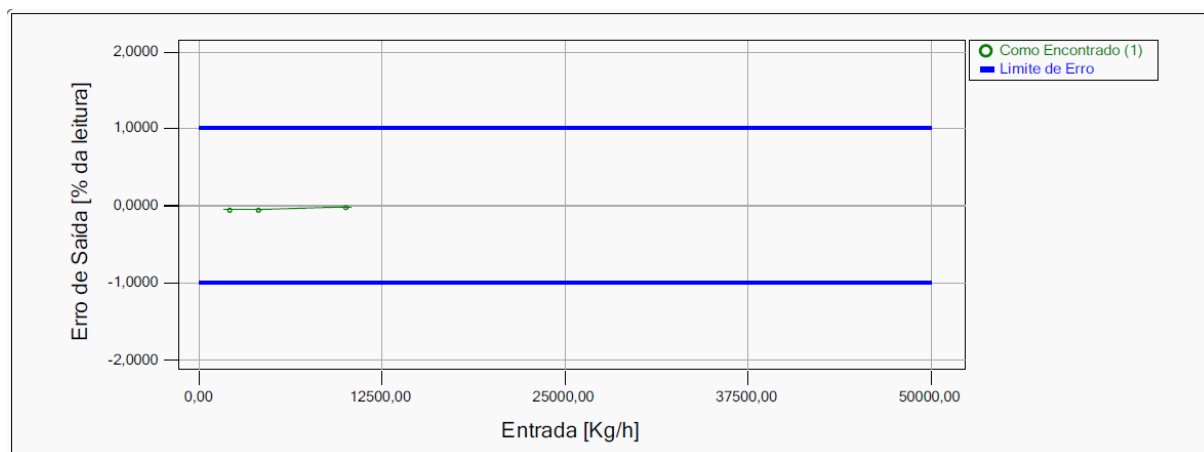


Figura 35 – Gráfico de resultados presente no certificado de aferição de calibração.

Fonte: EMPRESA 2019.

Como mostra a tabela de medições a seguir.

Tabela 5 - Tabela de leituras do certificado de aferição de calibração.

Erro Máximo: -0,049 % da leitura					
Entrada Nominal [Kg/h]	Atual Entrada [Kg/h]	Saída Nominal [Kg/h]	Atual Saída [Kg/h]	Encontrado Erro [% da leitura]	Incerteza Expandida [Kg/h]
0	2058,21	0	2057,25	-0,047	0,00028
25000	4102,85	25000	4100,84	-0,049	0,00014
50000	10027,84	50000	10025,97	-0,019	0,00006

Fonte: EMPRESA 2019.

A parte mecânica/estrutural foi implementada seguindo as especificações de projeto, e devidamente pintada.



Figura 36 – Projeto previamente montado.

Fonte: Do autor.

Feito isso, o próximo passo foi a montagem e instalação do painel elétrico onde está localizado o inversor de frequência *Allen-Bradley Powerflex 525* que fará o controle do motor e consequentemente da vazão.



Figura 37 - Painel elétrico.

Fonte: Do autor.

Para que fosse possível efetuar testes no projeto, foi instalado um medidor de vazão *Rosmount Vortex Flowmeter Model 8800*. Como mostra a imagem a seguir.



Figura 38 - Teste do projeto.

Fonte: Do autor.

Como manda o manual do fabricante, para o ideal funcionamento do medidor vortex foi confeccionado para sua montante uma tubulação com trecho reto de 508 mm, o que corresponde a dez vezes o seu diâmetro, e para sua jusante um trecho reto de 250,4 mm, correspondente a cinco vezes o diâmetro da tubulação.

4. PROCEDIMENTO DE UTILIZAÇÃO

A empresa possui um procedimento corporativo de aferição de calibração de medidores de vazão, utilizado pela unidade de Londrina e de Taquari. Tal procedimento é aprovado pelo gerente de manutenção de ambas unidades. Tal documento é baseado nos procedimentos de metrologia que conferem a certificação da ISO 9000 para instrumentos controlados de processo (não podendo ser inteiramente reproduzido devido a política de confidencialidade de procedimentos e documentos da empresa), temos a seguir um passo a passo da utilização da bancada de testes de calibração.

Antes da utilização é importante que o instrumento esteja totalmente limpo e isento de impurezas que possam causar algum dano ao padrão. Solicitar aos operadores de produção o bloqueio das conexões de entrada e saída do instrumento, assim como a descontaminação interna do instrumento, assegurando que nenhum resíduo permaneça no interior dele.

4.1.UTILIZAÇÃO DO PADRÃO

O Padrão de testes de calibração de Vazão é um instrumento de uso controlado, a ser utilizado apenas por profissionais capacitados. Devidamente calibrado conforme o período apontado em seu plano de manutenção. Montado sobre um carrinho móvel, que possibilita a conexão em vários tipos de medidores de vazão. Ele deve ter o tanque abastecido com água limpa para o teste de calibração do instrumento. A escolha do fluido se dá devido as preocupações ambientais da empresa, baixo custo e facilidade de acesso.

4.2.TESTES

Como apresentado no procedimento padrão, os testes devem ser executados por meio de um ciclo, em que ocorram pelo menos três tomadas de vazão (nula, média e máxima do *range* do equipamento), respeitando a vazão instantânea e a vazão totalizada utilizada no processo, a fim de atestar o bom funcionamento do instrumento nas condições de operação. Atentando para a unidade de medida a ser calibrada (L/H ou L/min).

Deste modo, inicialmente deve-se ligá-lo a alimentação elétrica trifásica. Feito isso deve-se aferir a primeira tomada de medição, na vazão zero. Após isso faz-se o controle de vazão alterando a velocidade de giro do motor, através do inversor de frequência. Busca-se então a vazão mediana do *range* do processo, e em seguida a vazão máxima. Mais pontos podem

ser aferidos se houver a necessidade. A válvula da tubulação responsável pela devolução da água para o tanque pode ser utilizada como meio de ajuste fino da vazão.

Tudo isso é feito com a finalidade de comparar a vazão medida pelo medidor mestre, e o medidor em testes, registrando os dados conforme o próximo capítulo.

Ao final do uso, assegurar a drenagem total do instrumento calibrado e o alinhamento do mesmo ao processo. Descartar a água utilizada na planta onde os testes foram executados. Solicitando o auxílio da operação para essas atividades.

4.3.REGISTRO DAS INFORMAÇÕES

Conforme o procedimento padrão da empresa, no mínimo 3 pontos de vazão devem ser aferidos e comparados entre o instrumento padrão e o instrumento em testes. Uma vez que o medidor a ser testado e o mestre estejam conectados em série, deverão apresentar valores de vazão próximos em seu display.

As medidas coletadas devem ser dispostas em uma planilha, da qual conste uma coluna para os pontos do medidor mestre, uma coluna para os pontos do medidor em testes, e uma terceira coluna apresentando o erro entre eles em cada ponto. Deste modo o erro de maior valor será considerado como o nível de incerteza do instrumento, conforme procedimento corporativo.

Por fim, se o erro for menor ou igual o estipulado pelo manual do fabricante, o instrumento é certificado como “aprovado”, caso contrário é certificado como “reprovado”.

5. PROJETOS SEMELHANTES

5.1. AVALIAÇÃO METROLÓGICA DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO

Foi apresentado um projeto semelhante na Univates no ano de 2011, por parte do aluno Guilherme Bergmann.

O princípio de funcionamento é o mesmo, fazendo uso também do método medidor mestre, e de uma bomba que faz circular água pela malha., como podemos ver na imagem a seguir.

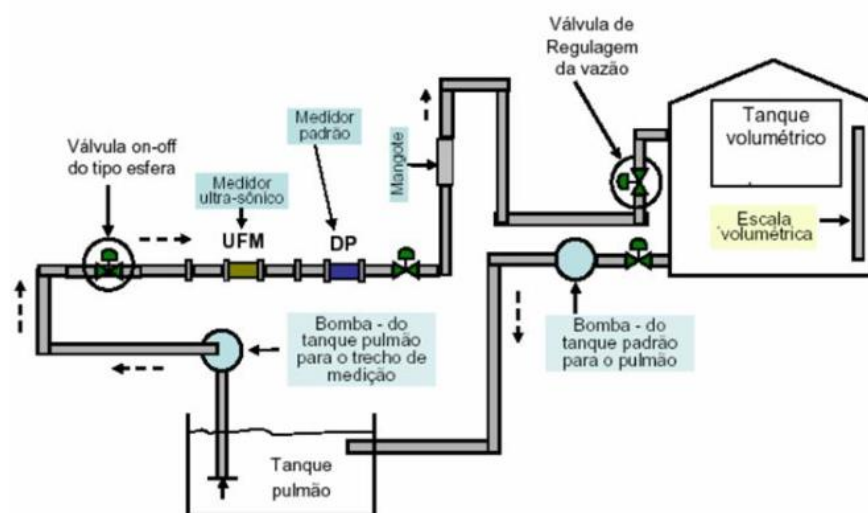


Figura 39 - Projeto semelhante.

Fonte: BERGMANN.

Porém o medidor utilizado pelo autor como mestre é um medidor de pressão diferencial. Tal medidor apresenta uma exatidão de aproximadamente 0,075% dos valores medidos, contra 0,049% do medidor Coriolis utilizado neste presente projeto.

Além do medidor mestre, o projeto em questão ainda contará com uso de mais dois medidores de princípios diferentes, sendo eles linear eletromagnético (exatidão de 0,5%) e linear por área variável (exatidão de 2%).

A montagem da bancada foi feita no laboratório da Univates, uma vez que não necessita de mobilidade. Enquanto o meu projeto que será utilizado em plantas industriais, foi montado em cima de um carrinho para possibilitar o transporte.



Figura 40 - Bancada montada no laboratório.

Fonte: BERGMANN.

Para melhor comparar, deve-se analisar o objetivo de cada trabalho:

Este trabalho tem como objetivo realizar uma avaliação metrológica de sistemas de medição de vazão, analisando-se as incertezas envolvidas. Nele serão avaliados três medidores com diferentes princípios de medição: geradores de pressão diferencial por placa de orifício, linear eletromagnético e linear por área variável. Foi utilizado um microcomputador do tipo PC industrial e um software de supervisão, que efetua a aquisição de dados dos equipamentos e os apresenta por meio de animações de telas. No microcomputador, através do sistema supervisório, tem-se a visão geral e o controle total da planta de líquidos. Pode-se controlar e visualizar todas as variáveis do processo (Bergmann).

Sendo assim pode-se concluir que a maior diferença está no fato de que enquanto o projeto de Bergmann visa comparação entre níveis de incertezas de diferentes tipos de medidores, este presente trabalho busca desenvolver o projeto de uma bancada de testes e calibração para medidores de vazão, visando uma redução de custos com calibrações e a prevenção de perdas de matéria prima por dosagens inconvenientes.

5.2.BANCADA GRAVIMÉTRICA AUTOMÁTICA PARA CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES DE VAZÃO COM DIFERENTES FLUIDOS

Assim como no presente trabalho, o projeto de Miriam Zareth Parra Sejas visa a construção de uma bancada de testes para medidores de vazão. Que possibilita o emprego de fluidos de trabalho, inclusive fluidos explosivos e inflamáveis, o que no meu trabalho não foi

previsto, uma vez que a empresa que irá utilizá-lo não permite a utilização de tais fluídos, devido a sua utilização em áreas classificadas como de risco.

O método de teste de calibração escolhido se difere do aqui utilizado, trata-se do método gravimétrico, e não medidor mestre. Esta bancada então não usa de um medidor padrão, mas confronta o valor aferido pelo medidor a ser calibrado com o valor em massa determinado por uma balança marca MARTE modelo série UX6200H.

Sendo assim, utiliza de dois tanques um tanque superior, que tratado como tanque pulmão, cuja função é alimentar o sistema com a vazão mais constante possível, e um tanque inferior, chamado tanque de armazenamento ou tanque de descarga, cuja função é armazenar o fluido que sai do sistema de medição para ser bombeado para o tanque pulmão. Como podemos ver na imagem 41.

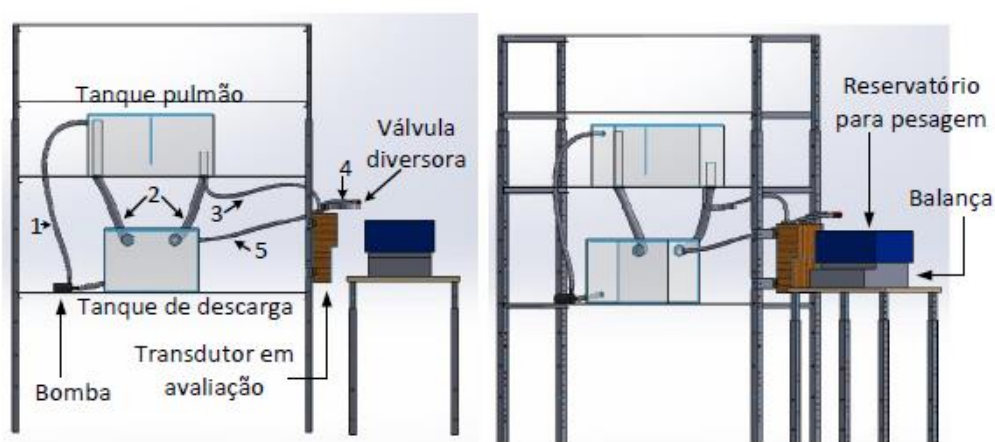


Figura 41 - Esquema da bancada gravimétrica.

Fonte: SEJAS, Mirian Z. P.

A exatidão apresentada pela autora do projeto é de aproximadamente 0,20%, a mesma exatidão apresentada pelo fabricante do Coriolis o que dá uma diferença de 0,151%, uma possibilidade de erro muito maior por parte da bancada gravimétrica.

Outro ponto que se difere é o fato de que a montagem da bancada foi feita em uma estante fixa, uma vez que não necessita de mobilidade. Enquanto este presente projeto que será utilizado em plantas industriais, foi montado em cima de um carrinho para possibilitar o transporte.

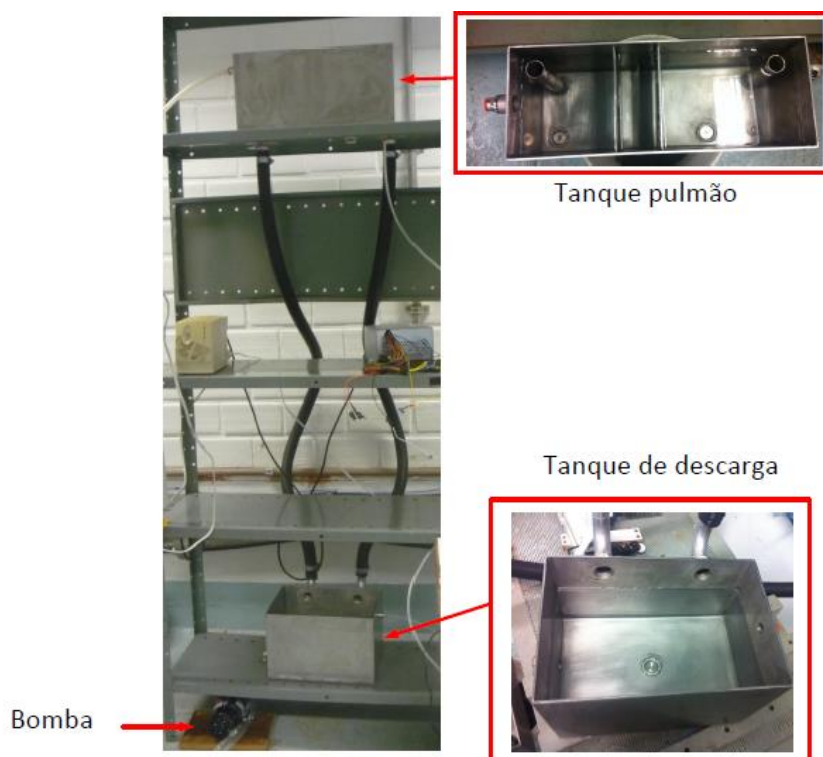


Figura 42- Bancada fixa

Fonte: SEJAS, Mirian Z. P.

5.3.DESENVOLVIMENTO DE UMA PLANTA PARA CALIBRAÇÃO E AJUSTES DE MEDIDORES DE VAZÃO MAGNÉTICOS.

O autor Emerson Barbosa de Faria implementou um projeto de uma planta dentro do parque industrial para testes e calibração dos medidores vazão magnéticos utilizados na empresa. Enquanto o presente trabalho oferece testes e calibração a quaisquer tipos de medidor disponíveis na empresa.

O método utilizado foi o mesmo, chamado por Faria de “comparativo”, consiste no método medidor mestre.

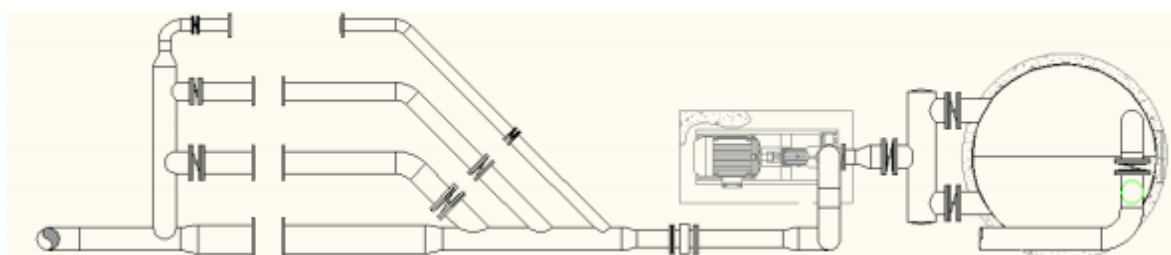


Figura 43 - Esquema planta de testes de calibração de Faria.

Fonte: FARIA, Emerson B.

Não foi especificado o tipo de medidor mestre utilizado, porém levando em consideração que medidores do tipo magnético carretel apresentam em média um erro de 0,5%, e os magnéticos do tipo de inserção apresentam um erro de 1 a 2%, este presente projeto se mostra superior, com erro máximo de 0,049%.

Outro ponto em que se difere, é necessidade de deslocamento do medidor do local onde é utilizado, até o local onde se encontra a planta de testes, uma vez que sua estrutura é fixa. Já esta bancada móvel pode ser levada a praticamente qualquer lugar para efetuar seus testes e calibrações.



Figura 44 - Bancada física do projeto de Faria.

Fonte: FARIA, Emerson B.

Um ponto positivo para o projeto de Faria, é a possibilidade de efetuar testes em mais de um medidor ao mesmo tempo, enquanto neste projeto só é possível testar um medidor por vez.

6. RESULTADOS

O primeiro teste de calibração utilizando o projeto foi feita pela empresa Linear, que é a responsável por calibrar os medidores de vazão da empresa. Tal teste foi feito respeitando o procedimento corporativo padrão de certificação da empresa, já citado anteriormente, que leva em consideração a execução de pelo menos três pontos de vazão (nula, média e máxima do range do equipamento) respeitando a vazão instantânea e a vazão totalizada utilizada no processo, a fim de atestar o bom funcionamento do instrumento nas condições de operação. O que neste caso seria a aferição de calibração de um medidor vortex, *Rosemount* modelo 8800D para o range de processo de 0 a 10.000 L/H.

O teste foi feito utilizando água como fluido, em temperatura ambiente. Foram coletados 5 pontos divididos ao longo do range da qual foi comparado o valor mostrado no medidor a ser testado com o valor medido pelo instrumento mestre. Da qual sua diferença representa a porcentagem de incerteza.

Deste modo foi possível montar tabela de medidas coletadas no teste. O erro é calculado subtraindo o valor medido pelo instrumento em testes do valor medido pelo instrumento padrão. Tendo posse do erro, é possível calcular o valor de incerteza, através da porcentagem de erro dividida pela medida do instrumento padrão. A média é dada entre os valores padrão e em testes.

Tabela 6 - Teste do projeto

Instrumeto Padrão	Instrumento em Teste		Média		Erro	Incerteza
L/H	Acendente	Descende	Acendente	Descende		
0,0	0,00	0,00	0	0,00	0,0	0
3114,1	3122,40	0,00	3118,25	0,00	8,3	0,27%
5128,8	5160,30	0,00	5144,55	0,00	31,50	0,61%
7540,1	7575,40	0,00	7557,75	0,00	35,30	0,47%
9929,8	9992,10	0,00	9960,95	0,00	62,30	0,63%

Fonte: Linear Automação e Elétrica Industrial.

Então foi certificado que a incerteza máxima é de 0,63%, estando dentro dos 0,65% de acurácia (para líquidos) deste modelo de medidor. Deste modo o medidor foi aprovado.

Calculando a média de incertezas temos:

$$M = \frac{P1 + P2 + P3 + \dots + PN}{N} = \frac{0 + 0,27 + 0,61 + 0,47 + 0,63}{5} = 0,39 \%$$

Sendo assim, pode-se dizer que a média das incertezas fica em torno de 0,39%, relativamente baixa quando comparado ao especificado pelo manual do instrumento, que é de 0,65%.

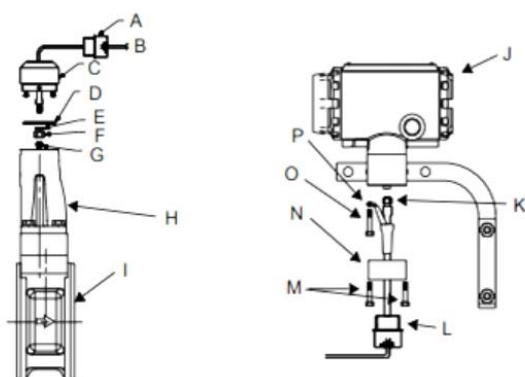


RELATÓRIO DE CALIBRAÇÃO E MANUTENÇÃO DE TRANSMISSOR DE VAZÃO

Data: 29.05.2020
Nº Certificado: 01-405_01/2020

DESCRIÇÕES DO INSTRUMENTO				INFORMAÇÕES	
TAG:	02-0405FIT001			Contra Pressão Constante:	-
Cliente:	Adama Brasil	Nº Ordem:	-	Contra Pressão Variável:	-
Fabricante:	Rosemount	Local:	Reserva	Temperatura de Operação:	(-40°C ~ 232°C)
Bitola:	2" ~ 2"	Classe:	-	Pressão de Operação:	-
Serviço:	Transmitir Vazão	Tipo:	Vortex	Fluido:	H2O
Modelo:	8800D	Nº Série:	14931837		

DESENHOS REPRESENTATIVO



INSPEÇÃO VISUAL DE RECEBIMENTO

Placa de Identificação:	Sim	Não✓
Lacre:	Sim	Não✓
Tubulação Limpas	Sim✓	Não
Externo Limpas	Sim✓	Não
Internos Limpas	Sim✓	Não

COMENTÁRIOS

Foram utilizados dois padrões para calibração do mesmo.
1.1-Transmissor padrão 0 ~ 25000L/H. 1.2-Hart475

TESTE DE RECEPÇÃO

Nenhum.

OBSERVAÇÕES

Unidade de Medida: Litros/Hora.

CALIBRAÇÃO

0 ~ 10000 L/H

INDICAÇÕES OU REFERÊNCIAS

Instrumento Padrão L/H	Instrumento em Teste		Média		Erro	Incerteza
	Acidente	Descende	Acidente	Descende		
0,0	0,00	0,00	0	0,00	0,0	0
3114,1	3122,40	0,00	3118,25	0,00	8,3	0,27%
5128,8	5160,30	0,00	5144,55	0,00	31,50	0,61%
7540,1	7575,40	0,00	7557,75	0,00	35,30	0,47%
9929,8	9992,10	0,00	9960,95	0,00	62,30	0,63%

INSPEÇÃO VISUAL DOS COMPONENTES INTERNOS/EXTERNOS

PADRÕES UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO

ITENS/COMPONENTES	CONFORME	NÃO CONFORME	NÃO POSSUI	TAG	MODELO	VALIDADE.CAL	NºCERT
A. Prensa-Cabo	✓			Hart	475	-	-
B. Cabo Coaxial	✓			Trans.Padrão	3704681	-	-
C. Adaptador do Medidor	✓						
D. Junção	✓						
E. Arruela	✓						
F. Porca	✓						
G. Porca do Sensor	✓						
H. Tubo de Suporte	✓						
I. Corpo do Medidor	✓						
J. Componentes Eletrônicos	✓						
K. Porca de Cabo Coaxial	✓						
L. Adaptador do Condulete	✓						
M. Par. Adaptador do invólucro	✓						
N. Adaptador do invólucro	✓						
O. Par. da Base do Invólucro	✓						
P. Conexão de aterramento	✓						

Situação
APROVADO

DATA DE CALIBRAÇÃO
29.05.2020

DATA DE EMISSÃO
29.05.2020

Técnico Executante

Responsável

Figura 45 - Certificado de Aferição de Calibração

Fonte: Linear Automação e Elétrica Industrial.

Além disto, foi inspecionado visualmente e certificado os componentes internos e externos do medidor que estava sendo calibrado. Como pode ser observado na figura 45, todos foram aprovados, uma vez que o medidor era novo e estava guardado como reserva.

Foi possível plotar este gráfico, e observar o quão próximos ficaram os pontos de medição, demonstrando que o medidor em testes apresentou bons resultados quando comparado ao medidor padrão.

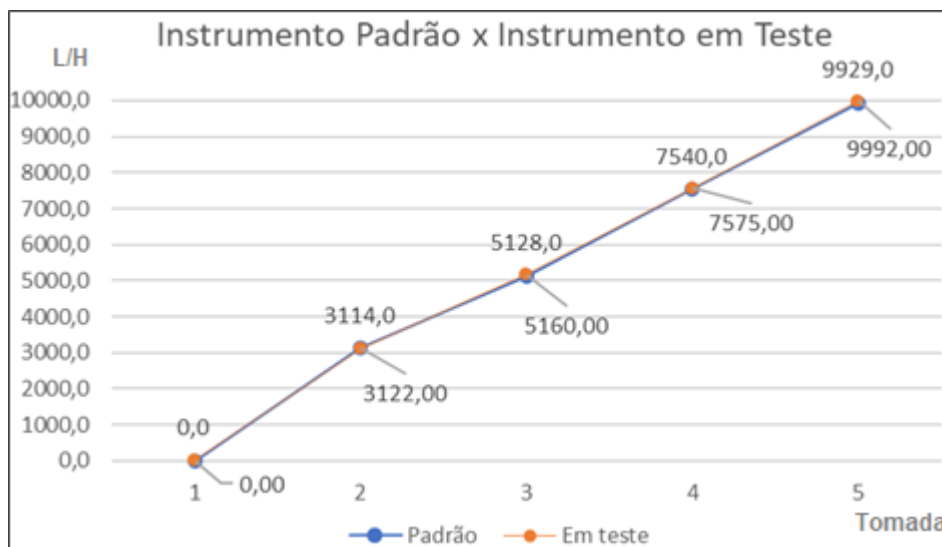


Figura 46 - Gráfico Padrão x Em teste.

Fonte: Do autor.

6.1.RESULTADOS APRESENTADOS NOS TRABALHOS SEMELHANTES

6.1.1. AVALIAÇÃO METROLÓGICA DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO

Neste projeto buscaram efetuar os testes de vazão comparando os dois modelos de medidores com o medidor padrão LD 302, resultando assim nos valores de erro em cada ponto. No caso do primeiro modelo, eletromagnético 8742, o maior valor de erro encontrado foi de - 2,12%, como podemos ver na tabela abaixo.

Tabela 7 - Pontos de vazão e incertezas do medidor eletromagnético 8742

Ponto de calibração	Vazão média do padrão LD302 [l/min]	Vazão média do 8742 [l/min]	Erro relativo de indicação do 8742 [%]	Incerteza expandida da medição U do 8742 [l/min]	Fator de abrangência $k_{95,45\%}$	Resultado da medição $Q = q \pm U$ [l/min]
1	10,09	9,87	-2,12	0,02	2	9,87±0,02
2	20,30	20,20	0,52	0,40	2	20,20±0,40
3	30,01	29,96	-0,16	0,02	2	29,96±0,02
4	40,05	39,91	-0,36	0,03	2	39,91±0,03
5	49,80	49,64	-0,32	0,11	2	49,64±0,11

Fonte: BERGMANN.

Já no modelo de área variável AP-7000, como já era de se esperar, o erro foi maior, ficando em -29,61%, comparado ao medidor padrão. Como podemos ver na tabela a seguir.

Tabela 8 - Pontos de vazão e incertezas do medidor de área variável AP-7000

Ponto de calibração	Vazão média do padrão LD302 [l/min]	Vazão média do AP-7000 [l/min]	Erro relativo de indicação do AP-7000 [%]	Incerteza expandida da medição U do AP-7000 [l/min]	Fator de abrangência $k_{95,45\%}$	Resultado da medição $Q = q \pm U$ [l/min]
1	10,09	7,1	-29,61	0,5	2	7,1±0,5
2	20,30	19,5	-3,95	0,5	2	19,5±0,5
3	30,01	29,0	-3,37	0,5	2	29,0±0,5
4	40,05	38,5	-3,88	0,5	2	38,5±0,5
5	49,80	48,1	-3,47	0,5	2	48,1±0,5

Fonte: BERGMANN.

Ao comparar tais resultados com os deste presente projeto, é possível ver que a diferença principal está no objetivo apresentado, pois ao aferir e calcular as incertezas busca-se um comparativo de precisão entre os dois modelos de instrumento, e não uma calibração para uso industrial.

Quanto aos testes, seguiram a mesma linha de execução, foram coletados cinco pontos de medição respeitando o limite máximo e mínimo do range, e em seguida calculado o

percentual de erro comparado ao medidor padrão. Neste método a única diferença foi a escolha da variável de medida, que é o L/min ao invés de L/h.

6.1.2. BANCADA GRAVIMÉTRICA AUTOMÁTICA PARA CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES DE VAZÃO COM DIFERENTES FLUIDOS

Foi apresentado um comparativo entre valores de medição de vazão da bancada gravimétrica, e os valores de vazão apresentados no medidor Coriolis. Apresentado um erro máximo de 0,073%. Como podemos ver na tabela a seguir.

Tabela 9 - Resultados dos ensaios

Ensaio	Q_m Coriolis (kg/min)	Q_m Método gravimétrico (kg/min)	Erro (%)
1	0,07836	0,07837	0,012
2	0,07780	0,07780	0,008
3	0,07876	0,07876	0,007
4	0,07893	0,07889	0,046
5	0,07901	0,07907	0,073

Fonte: SEJAS, Mirian Z. P.

O foco dos resultados deste trabalho foi comprovar a precisão da bancada gravimétrica, para posteriormente utilizá-la como bancada de calibração. Enquanto este presente trabalho, como já havia certificado a sua precisão por via da aferição de calibração do medidor mestre, iniciou já pondo em prática sua função, efetuar testes de calibração em um medidor de vazão.

Quando ao desenvolvimento dos testes temos algo bastante semelhante, onde foram coletados também cinco pontos de medição de vazão e a partir daí calculado os valores de erro. Sendo diferente apenas a unidade de medida, que é o kg/min ao invés de L/H.

6.1.3. DESENVOLVIMENTO DE UMA PLANTA PARA CALIBRAÇÃO E AJUSTES DE MEDIDORES DE VAZÃO MAGNÉTICOS.

Já este trabalho, apresentou resultados que tem seu foco completamente diferente dos demais, onde calcularam o retorno financeiro da bancada no seu primeiro ano de funcionamento. Como podemos ver na tabela abaixo.

Tabela 10 - Custos antes e pós projeto

Descrição	Etapas	Valores (R\$)
Custo não realizado	Calibração dos Medidores	+194.880,00
Investimento da 1ª implantação	Planta de vazão	-72.137,77
Investimento da 2ª implantação	Automação da planta	-58.853,09
Investimento Final	Projeto automatizado	-130.990,86
Retorno Financeiro		+63.889,14

Fonte: FARIA, Emerson B.

Tal resultado ainda não é possível de ser apresentado neste presente trabalho, uma vez que a bancada não tem um tempo de funcionamento considerável.

Faria destacou também que além do retorno financeiro, o projeto possibilitou que a empresa possa ter um acompanhamento preventivo mais rigoroso a respeito da calibração medidores, o que facilita prever futuros problemas que possam eventualmente aparecer. Resultados do ponto de vista preventivo, também são esperados neste presente projeto.

7. CONCLUSÃO

No presente trabalho, foi realizado a implementação de uma bancada móvel de testes de calibração dedicada a diferentes tipos de medidores vazão líquidos no intervalo de até 10 L/h. Tal projeto foi implementado para uso da empresa de Taquari-RS.

Através dos testes iniciais já foi possível testar a calibração de um medidor Vortex, que será utilizado no processo operando em um range de 0 a 10.000 L/h. E isso foi possível através da tomada de 5 pontos de medição de vazão, distribuídos ao longo do Range, e em seguida calculado o erro máximo deste medidor, o que representa o seu percentual de incerteza. Foi possível concluir que o percentual de incerteza foi de 0,63%, dentro do limite do fabricante que é de 0,65%, sendo assim o medidor em testes foi certificado como calibrado.

Uma vez que a empresa conta com 42 medidores em uso diário, com calibrações feitas anualmente, e como já foi calculado no capítulo 3.8, estima-se que a bancada gere uma economia de R\$ 16.884,00 anuais para a empresa. Sendo o custo total do projeto de R\$ 78.638,57, calcula-se que o retorno financeiro ocorrerá após 5 anos de uso. Porém o retorno se torna ainda mais expressivo quando analisado sob a ótica de que a empresa utiliza matérias primas muito caras em sua produção, como por exemplo a matéria prima M325, cujo nome técnico não foi divulgado, seu preço é de R\$ 330,03 por quilo deste produto, passando em sua linha diariamente milhares de litros, que são aferidos por medidores de vazão. Caso ocorra uma falha de dosagem, com excesso ou falta deste componente químico, devido a um erro de calibração no medidor de vazão responsável, teríamos o comprometimento e perda de um lote inteiro, ocasionando uma despesa de milhões de dólares para a empresa.

Além da montagem física do projeto, estudou-se a possibilidade de implementá-lo também em um *software* simulador de malhas hidráulicas, na finalidade de enriquecimento dos estudos. Isto não foi possível, devido à escassez de *softwares* deste tipo no mercado.

Entre as melhorias previstas para o futuro, a principal é a substituição da motobomba por uma de maior vazão, para poder assim atender medidores que atuarão com maiores ranges no processo. Também serão montados mangueiras e flanges de jusante e montante, para facilitar a conexão. Serão criados também suportes para os medidores em testes, o que possibilitará a instalação dos mesmos fora da estrutura da bancada, pois afastando o instrumento da vibração da bomba, temos uma melhora em sua precisão.

Comparando como os trabalhos semelhantes, foi possível observar que cada um possui sua particularidade, onde no trabalho do Bergmann, o foco foi um comparativo de precisão

entre diferentes tipos de medidores. Já no projeto de Sejas, temos um objetivo semelhante ao nosso, de bancada de testes de calibração, porém utilizando um método diferente e de menor precisão do que o método medidor mestre apresentado neste trabalho. O trabalho de Faria se assemelha muito a este, pois atua no âmbito industrial, na forma de uma bancada de testes de calibração. Sendo diferente apenas no fato de apresentar como resultado o retorno financeiro, ao invés de testes práticos. Sendo assim, através da apresentação dos três projetos mais parecidos encontrados a disposição do público, se faz possível concluir que não existe nenhum projeto exatamente igual ao outro, e nenhum deles igual a este presente trabalho. Cada um possui suas características, que atendem diferentes propósitos.

O ideal seria produzir mais testes com a bancada, utilizando diferentes tipos de medidores e efetuando tomadas de medição de maneira ascendente e descendente, no intuito de analisar as variações de erros. Porém isto não foi possível devido ao cenário da pandemia de Covid-19 presente na época.

Durante a realização deste trabalho, pode-se elevar ainda mais o conhecimento adquirido no decorrer do curso, principalmente durante a etapa de projetar a bancada. Da qual várias áreas de estudos, entre elas física e instrumentação, foram pesquisadas, a fim de esclarecer dúvidas e encontrar métodos que trouxessem resultados satisfatórios a para este projeto. E outro ponto importante, foi atender a possibilidade de promover uma melhoria prática na empresa.

8. REFERÊNCIAS

BEGA, Egídio A. **“Instrumentação Industrial”**. 2º ed. Rio de Janeiro: Interciência: IBP, 2006. ISBN 85-7193-137-2.

DUNN, Willian C. **“Fundamentos de Instrumentação Industrial e Controle de Processos”**. V.1. Rio de Janeiro. 2013. ISBN: 8582600917.

ROSA, José Eduardo P. **“Uma Abordagem da Hidrodinâmica para o Ensino Médio”**. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/2794/4/JEPRosa.pdf>>. Acesso em 24 de agosto de 2019.

GASPARINI, Rômulo Luis, et e tal. **“Uma abordagem da hidrodinâmica para o ensino médio”**. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/2794>>. Acesso em 24 de agosto de 2019.

CASSIOLATO, César et e tal **“Medição de Vazão”**. Disponível: <<http://www.profibus.org.br/images/arquivo/pdf-2-543ec3eeb4df5.pdf>>. Acesso em 24 de agosto de 2019.

GIMENES, Rogério D. **“Calibração de medidores de vazao, Notas de estudo de Mecatrônica”**. Disponível em: <<https://www.docsity.com/pt/rogerio-dias-gimenes-ma25-calibracao-de-medidores-de-vazao/4891691/>>. Acesso em 29 de agosto de 2019.

Petrobras. **“Apostila de Instrumentação - PETROBRAS”** Disponível em: <<https://docente.ifrn.edu.br/samueloliveira/disciplinas/instrumentacaoindustrial/apostilas/apostila-de-instrumentacao-petrobras/view>>. Acesso em 20 de setembro de 2019.

Homis do Brasil, **“À história dos instrumentos e sua origem.”**. Disponível em: <<https://www.homis.com.br/historia-instrumentacao>>. Acesso em 20 de setembro de 2019.

BRANDÃO, Dennis. **“Redes de Comunicação Industrial”**. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1815226/mod_resource/content/0/SEL0432_2016_Instrumenta%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em 20 de setembro de 2019.

BERTULANI, C. **“Viscosidade, turbulência e tensão superficial.”** agosto 1999. Disponível em: <<http://www.if.ufrj.br/~bertu/fis2/hidrodinamica/viscosidade.html>>. Acesso em 21 de setembro de 2019.

TECNOINDUSTRIA. **“METODO APROXIMADO Nº 3 : FLUJO DE FLUIDOS EN TUBERIAS”**. Disponível em: <<https://technoindustria.wordpress.com/2018/03/21/metodo-aproximado-no-3-flujo-de-fluidos-en-tuberias/>>. Acesso em 24 de setembro de 2019.

BLASTER CONTROLES. **“Medidor de vazão tipo rotâmetro”**. Disponível em: <<https://www.blastercontroles.com.br/medidor-de-vazao-tipo-rotametro.php>>. Acesso em 24 de setembro de 2019.

GONÇALVES, Genildo M. **“Medidor Vortex Conceitos, tecnologia e aplicações na medição de vazão”**. Disponível em: <<http://abreueoliveira.com.br/wp-content/uploads/Publica%C3%A7%C3%B5es2.pdf>>. Acesso em 04 de outubro de 2019.

PUHLMANN. “**Metodologia para a seleção de um medidor de vazão de líquidos.**” Disponível em: <<https://consulteengenheiroeletronico.com/2016/07/19/metodologia-para-a-selecao-de-um-medidor-de-vazao-de-liquidos/>>. Acesso em 04 de outubro de 2019.

SMAR. “**MEDIDOR DE VAZÃO TIPO TURBINA.**”. Disponível em: <<https://www.smartinstec.com.br/medidor-de-vazao-turbina>>. Acesso em 05 de outubro de 2019.

INCONTROL. “**MEDIDORES DE VAZÃO TIPO TURBINA**”. Disponível em: <<http://www.levelcontrol.com.br/Fotos/Vazao/Turbina.pdf>>. Acesso em 05 de outubro de 2019.

FMC ENERGY SYSTEMS. “**Coriolis mass meters-mass meters for liquid measurement.**” FMC Energy Systems, v. 4, 2005. Acesso em 05 de outubro de 2019.

MECATRÔNICA ATUAL. “**Medidores de Densidade em Linha.**” Disponível em: <<http://www.mecatronicaatual.com.br/educacao/1180-medidores-de-densidade-em-linha>>. Acesso em 05 de outubro de 2019.

SMART MEASUREMENT. “**Delta-tubed coriolis mass flow meter**”. Disponível em: <<http://www.smartmeasurement.com/delta-tubed-coriolis-mass-flow-meter-p-2.html>>. Acesso em 05 de outubro de 2019.

MECÂNICA DOS FLUIDOS. “**Medidores de vazão**”. Disponível em: <http://www.mecanicadosfluidos.blogspot.com.br/2010/11/medidores-de-vazao_01.html>. Acesso em 05 de outubro de 2019.

EMERSON. “**Medição da vazão magnética.**”. Disponível em: <<https://www.br.endress.com/pt/produtos/vaz%C3%A3o/vazao-medidor-eletromagnetico>>. Acesso em 07 de outubro de 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. “**Measurement of liquid flow in closed conduits - Weighing method-ISO 4185.**” New Jersey, 1993. Acesso em 07 de outubro de 2019.

DSW. “**Medidor de vazão ultrassônico portátil.**” Disponível em: <<https://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/instrumentacao/techmeter/produtos/instrumentacao/medidor-de-vazao-ultrassonico-portatil-1>>. Acesso em 07 de outubro de 2019.

OMEGA. “**Diferença Entre Medidores de Vazão Ultrassônicos por Efeito Doppler e Tempo de Transito.**” Disponível em: <<https://br.omega.com/artigos-tecnicos/dif-between-doppler-transit-time-ultrasonic-flow-meters.html>>. Acesso em 07 de outubro de 2019.

SANTANA, Andrielle C.. “**Instrumentos de Vazão.**” Disponível em: <http://professor.ufop.br/sites/default/files/adrielle/files/aula_8.pdf>. Acesso em 08 de outubro de 2019.

GERÔNIMO. **“Medidores Mássicos e Magnéticos”** Disponível em: <<http://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840921/208/Aula8.MedidoresMassicoseMagneticos.pdf>>. Acesso em 08 de outubro de 2019.

PAULO. **“Medição de pressão.”** Setembro 2015. Disponível em: <http://portalinstrumentacao.blogspot.com.br/2015_09_01_archive.html>. Acesso em: Acesso em 10 de outubro de 2019.

Bottega et al. (2010). **“Conceitos de exatidão e precisão”**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Conceitos-de-exatidao-e-precisao_fig1_269696007>. Acesso em 25 de outubro de 2019.

PROCESS SYSTEMS. **“Valve/Pneumatic Symbols.** Disponível em: <<https://www.valvesonline.com.au/references/valve-pneumatic-symbols/>>. Acesso em 25 de outubro de 2019.

SEJAS, Mirian Z. P. **“BANCADA GRAVIMÉTRICA AUTOMÁTICA PARA CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES DE VAZÃO COM DIFERENTES FLUIDOS”**. Disponível em: < <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/176667>>. Acesso em 30 de Abril de 2020.

BERGMANN, Guilherme. **“AVALIAÇÃO METROLÓGICA DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO”**. Disponível em: < <https://www.univates.br/bdu/bitstream/10737/256/1/GuilhermeBergmann.pdf>>. Acesso em 10 de maio de 2020.

FARIA, Emerson B. **“DESENVOLVIMENTO DE UMA PLANTA PARA CALIBRAÇÃO E AJUSTES DE MEDIDORES DE VAZÃO MAGNÉTICOS.”** Disponível em: < http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6520/6/CP_COAUT_2015_1_06.pdf>. Acesso em 19 de maio de 2020.